



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de Génie mécanique

ANALYSE DU PROCÉDÉ DE CRÊPAGE DU PAPIER ET SUIVI
DE L'USURE DES LAMES DE CRÊPAGE PAR ÉMISSION
ACOUSTIQUE

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées
Spécialité : génie mécanique

Jean THÉBERGE

Sherbrooke (Québec), Canada

Août 2008

Composition du jury

Ahmed MASLOUHI
Marc DESAULNIERS
Patrice MASSON

TV-1885



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-43025-5

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-43025-5

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Résumé

Ce document présente les approches suivies et les résultats des investigations théoriques et expérimentales entreprises dans le cadre de l'étude du procédé de crêpage du papier depuis le début de la maîtrise faite en collaboration avec Kruger Produits Ltée. L'objectif du projet est de mieux comprendre les phénomènes reliant la qualité du papier à l'état d'usure des lames de crêpage. À cette fin, une méthode expérimentale basée sur les techniques de mesure par émission acoustique afin de suivre en temps réel le comportement mécanique et l'état d'usure des lames est proposée. Ce suivi en temps réel permet d'identifier par émission acoustique les mécanismes reliés à l'usure des lames par friction et d'établir une corrélation entre le comportement mécanique de la lame et les différents paramètres de qualité du papier, dont le crêpage.

Ce mémoire présente donc en premier lieu la problématique du projet, les éléments fondamentaux qui entrent en jeu lors du procédé de crêpage, la description des lames utilisées dans le procédé industriel, l'analyse des principes de base des phénomènes d'usure des lames en relation avec les aspects métallurgiques du matériau et enfin, les principes du suivi de l'usure par la technique d'émission acoustique et le traitement numérique des signaux. La deuxième partie du mémoire s'attarde sur les procédures expérimentales suivies et sur la synthèse des résultats obtenus. La troisième partie présente la conclusion sur les résultats obtenus à partir de laquelle une série de recommandations sont mises de l'avant afin de permettre à l'entreprise d'améliorer l'opération de crêpage du papier.

Mots clés : Procédé de crêpage du papier, acier martensitique AISI 420, microscope électronique à balayage, analyse métallurgique, émission acoustique, ultrasons, traitement de signal, analyse en composantes principales, réseaux de neurones.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier M. Ahmed MASLOUHI, professeur en génie mécanique à l'Université de Sherbrooke, dont les directives et les conseils en tant que directeur de mémoire ont été d'une précieuse aide au cours de cette recherche.

Je désire aussi remercier Kruger Produits Ltée, partenaire dans le projet de recherche, pour le soutien financier et technique apporté. Un merci particulier est souligné à M. Marc DESAULNIERS, gérant de la technologie papetière chez Kruger Produits Ltée, pour son soutien lors de la recherche et son expertise dans le domaine du papier. Un merci spécial doit aussi être exprimé à M. Magella TREMBLAY, responsable du laboratoire des matériaux de l'Université de Sherbrooke, pour ses conseils et son aide pendant la réalisation de ce projet.

Je tiens aussi à remercier mes collègues du laboratoire LAMCND, Mme Mathilde GOSSELIN, M. Rached BEN AYED, M. Clément POULIQUEN, Mme Laure BACHELLERIE, M. Simon DEPARDON et M. Sébastien SCHAUB pour leur aide et leur présence tout au long de cette recherche.

Je témoigne ma gratitude aux membres du Jury, M. Patrice MASSON, professeur à la faculté de génie de l'Université de Sherbrooke, et à M. Marc DESAULNIERS, gérant de la technologie papetière chez Kruger Produits Ltée, qui ont gracieusement accepté d'examiner ce mémoire.

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1 Motivation et contexte	1
1.2 Objectif et approche.....	3
1.3 Organisation du mémoire	4
2. CADRE THÉORIQUE.....	6
2.1 Procédé de crêpage	6
2.1.1 Procédé de crêpage de Kruger Produits Ltée.....	6
2.1.2 Définition du crêpage	7
2.1.3 Paramètres influençant la qualité du crêpage	8
2.2 Caractéristiques du papier	12
2.2.1 Description de la pâte à papier	12
2.2.2 Modèle théorique du flambage du papier	13
2.2.3 Paramètres de qualité du papier.....	17
2.3 Lames utilisées	19
2.3.1 Description de la lame	19
2.3.2 Mécanismes d'usure de la lame.....	21
2.4 Principe de l'évaluation par émission acoustique.....	32
2.4.1 Description générale.....	32
2.4.2 Propagation des ondes d'émission acoustique dans les plaques minces	33
2.4.3 Capteur d'émission acoustique et système d'acquisition	35
2.4.4 Principes de l'instrumentation	36
2.4.5 Système d'émission acoustique utilisé pour le suivi du procédé de crêpage ..	37
2.4.6 Émission acoustique et usure par friction.....	39
2.5 Traitement numérique des signaux d'émission acoustique	42
2.5.1 Analyse paramétrique	42
2.5.2 Analyse en composantes principales	48
2.6 Applications de l'émission acoustique à l'usure	52
3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	57
3.1 Tests sur le papier	58
3.2 Tests sur les lames	59
3.3 Procédures pour l'évaluation par émission acoustique	60
4. RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX.....	63
4.1 Résultats des tests sur le papier	63
4.1.1 Corrélations entre les différents paramètres de qualité du papier	63
4.1.2 Résultats des tests sur le papier en relation avec les objectifs de qualité définis par l'entreprise.....	66
4.1.3 Évolution des paramètres de qualité du papier en fonction du temps	69
4.1.4 Évolution des paramètres de qualité du papier en fonction du temps pour un même rouleau	70
4.1.5 Évolution des paramètres papier selon la position sur la longueur de la lame (largeur du rouleau)	74
4.2 Résultats des essais métallurgiques sur les lames	77
4.2.1 Tests de dureté Rockwell C sur les lames en fonction de la position et du temps d'exposition à l'usure.....	77
4.2.2 Tests de microdureté Vickers sur les lames en fonction de la position et du temps d'exposition à l'usure.....	82

4.2.3	Analyse de la microstructure	85
4.2.4	Tests sur la largeur des lames selon la position longitudinale.....	89
4.2.5	Tests sur la mesure des largeurs des zones usées des lames à partir du MEB	91
4.2.6	Variation de l'aire de la surface déformée plastiquement en bout de lame.....	94
4.2.7	Mesure de la perte de matière des lames par microscopie optique	98
4.2.8	Microscope électronique à balayage (MEB)	100
4.2.9	Mesure du profil d'usure de la lame au profilomètre laser.....	107
4.2.10	Analyse du comportement des lames par éléments finis.....	109
4.3	Résultats des tests d'émission acoustique	121
4.3.1	Analyse paramétrique des signaux d'émission acoustique en fonction du temps	122
4.3.2	Projection des paramètres d'émission acoustique	129
4.3.3	Analyse en composantes principales	137
5.	CORRÉLATION DES DONNÉES.....	141
5.1	Corrélation entre la largeur des lames et la qualité du papier	141
5.2	Corrélation entre le gradient de pression du docteur, la largeur et l'usure des lames	143
5.3	Corrélation entre l'évolution de la zone de contact et de la pression effective et l'évolution de la qualité du papier en fonction du temps	144
5.4	Corrélation entre les contraintes appliquées sur la lame et son usure	146
5.5	Corrélation entre l'état des lames et la qualité du papier produit.....	148
5.6	Corrélation temporelle entre l'état de la lame et la qualité du papier.....	150
5.7	Corrélation entre l'émission acoustique et l'usure des lames	151
5.7.1	Analyse de la tendance des courbes RMS en relation avec les mécanismes d'usure par friction de la lame.....	156
5.7.2	Analyse de la projection RMS-Fréquence moyenne en relation avec les mécanismes d'usure.....	158
5.8	Corrélation entre l'émission acoustique et la qualité du papier	160
5.9	Méthode de fusion des données d'émission acoustique et de qualité de papier.....	164
5.10	Application de la technique des réseaux de neurones aux données d'émission acoustique et de qualité du papier	166
5.10.1	Introduction aux réseaux de neurones	166
5.10.2	Application des réseaux de neurones.....	167
5.10.3	Résultats et analyse.....	170
	CONCLUSION	176
	BIBLIOGRAPHIE	182
	Annexe I	184
	Annexe II	187
	Annexe III.....	193
	Annexe IV	204

Liste des figures

Figure 2.1 : Schéma de la zone de crêpage.....	6
Figure 2.2 : Procédé de crêpage	8
Figure 2.3 : Effet de l'angle de crêpage sur la qualité des crêpes	10
Figure 2.4 : Exemple de mauvaise (a) et bonne adhésion (b).....	11
Figure 2.5 : Unité de papier non crêpé	13
Figure 2.6 : Papier après flambage	14
Figure 2.7 : Modèle pour différentes fréquences de crêpes.....	14
Figure 2.8 : Évolution de l'épaisseur due au flambage en fonction de la longueur du papier crêpé pour différentes fréquences de crêpes.....	15
Figure 2.9 : Relation entre le ratio (Longueur de crêpe / bouffant) en fonction de la fréquence de crêpe [McConnell, s.d.].....	16
Figure 2.10 : Mode de rupture des fibres [McConnell, s.d.]	16
Figure 2.11 : Distribution des crêpes.....	18
Figure 2.12 : Schéma des frottements statique et dynamique [Ashby et coll., 1991]	22
Figure 2.13 : Schéma du contact entre les aspérités [Ashby et coll., 1991].....	23
Figure 2.14 : Six stades de la force de friction en fonction de la distance de frottement....	24
Figure 2.15 : Phénomène élémentaire de l'usure adhésive [Kapsa et coll., s.d.]	26
Figure 2.16 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant la déformation plastique	26
Figure 2.17 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant l'usure par adhésion.....	27
Figure 2.18 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des lignes d'usure abrasive	28
Figure 2.19 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des signes d'usure abrasive.....	29
Figure 2.20 : Photo prise avec un microscope optique d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant l'enlèvement de matière par abrasion.....	29
Figure 2.21 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame montrant des signes d'usure par impact [Freti et coll., 1999]	30
Figure 2.22 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des signes d'usure par érosion	31
Figure 2.23 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des sillons dans la zone d'usure.....	31
Figure 2.24 : Onde ultrasonore transversale.....	34
Figure 2.25 : Ondes de Lamb : mode symétrique et mode antisymétrique	34
Figure 2.26 : Vitesse de phase et de groupe pour un matériau donné selon le produit fréquence-épaisseur	35
Figure 2.27 : Représentation schématique d'un signal d'émission acoustique montrant la relation entre le signal et le seuil [Mechefske et coll., 2002]	37
Figure 2.28 : Signal typique d'émission acoustique due à l'usure par friction de métaux..	41

Figure 2.29 : Schéma de différents paramètres d'émission acoustique [Mechefske et coll., 2002].....	43
Figure 2.30 : Relation entre le niveau RMS des émissions acoustiques et le temps de coupe [Ravindra et coll., 1997]	53
Figure 2.31 : Relation entre la puissance du signal et l'usure frontale d'un outil de coupe [Ravindra et coll., 1997]	54
Figure 2.32 : Relation entre le fini de surface, le paramètre RMS et le temps d'utilisation d'un outil de coupe [Guo et coll., 2005].....	54
Figure 2.33 : Relation entre le taux de comptage des événements d'émission acoustique, le taux d'usure et le coefficient de friction [Hisakado et coll., 1997]	55
Figure 2.34 : Classification de signaux d'émission acoustique à l'aide de l'ACP (Projection des deux premières composantes principales) [Rippengill et coll., 2003].....	56
Figure 3.1 : Schéma du montage expérimental permettant de faire l'acquisition des signaux d'émission acoustique	61
Figure 3.2 : Photos du montage expérimental permettant de faire l'acquisition des signaux d'émission acoustique	61
Figure 4.1 : Évolution du pourcentage de crêpes fines en fonction du bouffant normalisé	64
Figure 4.2 : Évolution de la force de rupture normalisée dans le sens machine en fonction du bouffant normalisé.....	64
Figure 4.3 : Théorie du crêpage.....	65
Figure 4.4 : Variation du paramètre bouffant obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 1	67
Figure 4.5 : Variation du paramètre BLAH obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 1.....	67
Figure 4.6 : Variation du paramètre bouffant obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 2.....	68
Figure 4.7 : Variation du paramètre BLAH obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 2.....	68
Figure 4.8 : Variation du bouffant normalisé selon le diamètre (L5CR023)	71
Figure 4.9 : Variation du paramètre bouffant sur poids de base normalisé selon le diamètre (L5CR023).....	71
Figure 4.10 : Variation de la fréquence des crêpes normalisée selon le diamètre (L5CR023)	72
Figure 4.11 : Variation du paramètre GMT normalisé selon le diamètre (L5CR023)	72
Figure 4.12 : Variation du Bouffant normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019).....	74
Figure 4.13 : Variation du paramètre Bouffant sur poids de base normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)	75
Figure 4.14 : Variation du paramètre GMT selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019).....	75
Figure 4.15 : Variation du poids de base normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019).....	76
Figure 4.16 : Variation du paramètre BLAH normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)	76
Figure 4.17 : Emplacement des tests de dureté sur les lames.....	78
Figure 4.18 : Évolution de Dureté sur la longueur de la lame L5CR007 (5 min)	78
Figure 4.19 : Évolution de la dureté sur la longueur de la lame L5CR008 (21 min)	78
Figure 4.20 : Évolution de la dureté pour la lame L5CR004 (50 min)	79

Figure 4.21 : Évolution de la dureté pour la lame L5CR003 (90 min)	79
Figure 4.22 : Évolution de la dureté des lames selon le temps d'exposition à l'usure.....	81
Figure 4.23 : Illustration des emplacements des tests de microdureté (L5CR004).....	82
Figure 4.24 : Microdureté Vickers selon les lames et la position du test.....	83
Figure 4.25 : Microdureté Vickers selon le temps d'exposition de la lame à l'usure	84
Figure 4.26 : Microstructure dans la zone d'usure de la lame.....	86
Figure 4.27 : Microstructure de la lame usée vers le centre.....	87
Figure 4.28 : Dispersion du carbone sur la partie aiguisée de la lame neuve.....	87
Figure 4.29 : Présence de carbures sur la lame neuve aiguisée.....	88
Figure 4.30 : Mise en évidence de l'apparition de déformation plastique au niveau de la pointe de la lame.....	88
Figure 4.31 : Largeur des lames en fonction de la distance longitudinale de la lame (réf. côté capteur 1)	90
Figure 4.32 : Largeur des lames en fonction de la distance longitudinale de la lame (réf. côté capteur 1)	90
Figure 4.33 : Largeur de certaines lames en fonction de la distance longitudinale de la lame (réf. côté capteur 1).....	91
Figure 4.34 : Localisation des échantillons sur la lame.....	92
Figure 4.35 : Évolution de la largeur de la zone d'usure le long des lames.....	93
Figure 4.36 : Largeur de la zone d'usure en fonction du temps d'utilisation	93
Figure 4.37 : Mesure de l'aire de la zone déformée plastiquement	94
Figure 4.38 : Évolution de l'aire de la zone déformée plastiquement le long de la lame	95
Figure 4.39 : Évolution de l'aire de la zone déformée plastiquement en fonction du temps d'utilisation	96
Figure 4.40 : Évolution de l'écart (en %) entre l'aire de la zone déformée au centre de la lame et celle des extrémités	97
Figure 4.41 : Mesure de la perte de matière	98
Figure 4.42 : Évolution de la perte de matière en fonction du temps	99
Figure 4.43 : L5CR007_100 cm (5 min).....	101
Figure 4.44 : L5CR008_100 cm (21 min).....	102
Figure 4.45 : L5CR004_100 cm (50 min).....	102
Figure 4.46 : L5CR003_100 cm (90 min).....	103
Figure 4.47 : Évolution de la largeur de la zone d'usure et de la pression exercée par la lame sur le yankee en fonction du temps.....	104
Figure 4. 48 : Faciès d'usure de la lame L5CR007 (5 min) où l'on voit très peu d'usure adhésive	105
Figure 4.49 : Faciès d'usure de la lame L5CR008 (21 min) où l'on voit une zone de déformation plastique et une petite zone d'usure en biseau	106
Figure 4.50 : Faciès d'usure de la lame L5CR004 (50 min) où l'on voit des zones d'arrachement et des signes d'usure abrasive.....	106
Figure 4.51 : Résultats des tests au profilomètre laser montrant 2 zones distinctes de l'usure : le biseau d'usure par frottement et le sillon	108
Figure 4.52 : Représentation du sillon d'usure engendré par la déformation plastique et l'impact du papier à partir des tests au profilomètre laser.....	109
Figure 4.53 : Lame de crêpage dans son support	110
Figure 4.54 : Géométrie du bout de la lame après 6 minutes d'usure	111
Figure 4.55 : Largeur de la zone d'usure en fonction du temps d'exposition	112
Figure 4.56 : Pression appliquée par la lame sur le yankee.....	113
Figure 4.57 : Force de friction engendrée par le frottement.....	114

Figure 4.58 : 1 ^{ère} situation : Charge appliquée au point C et degrés de libertés fixés en y et en z sur la zone d'usure D	116
Figure 4.59 : 2 ^e situation : Charge appliquée sur la zone d'usure D et degrés de libertés fixés en y au point C	116
Figure 4.60 : Déplacements maximaux en compression selon l'axe y en fonction du temps d'exposition à l'usure	117
Figure 4.61 : Déplacements maximaux selon l'axe z en fonction du temps d'exposition à l'usure	117
Figure 4.62 : Déformés pour des temps d'exposition à l'usure de 6 et 89 minutes respectivement	118
Figure 4.63 : Valeurs absolues des contraintes maximales selon y et z en fonction du temps d'exposition à l'usure	119
Figure 4.64 : Distribution des contraintes en y près de la zone d'usure pour une exposition à l'usure de 89 minutes	120
Figure 4.65 : Distribution des contraintes en z près de la zone d'usure pour une exposition à l'usure de 89 minutes	120
Figure 4.66 : Représentation temporelle d'un signal d'EA émis par le frottement de la lame	123
Figure 4.67 : Représentation temps-fréquence du signal de la figure 4.64	123
Figure 4.68 : Représentation 3D des coefficients des ondelettes en fonction de la fréquence et du temps	124
Figure 4.69 : Évolution du niveau RMS en fonction du temps pour la lame L5CR003 ...	125
Figure 4.70 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR003	125
Figure 4.71 : Évolution du niveau RMS en fonction du temps pour la lame L5CR023 ...	126
Figure 4.72 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR023	126
Figure 4.73 : Évolution du niveau RMS en fonction du temps pour la lame de nettoyage L5CC002	128
Figure 4.74 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR003	130
Figure 4.75 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR004	130
Figure 4.76 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR006	131
Figure 4.77 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR008	131
Figure 4.78 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR017	133
Figure 4.79 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR018	133
Figure 4.80 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR019	134
Figure 4.81 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR020	135
Figure 4.82 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR022	135
Figure 4.83 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR023	136

Figure 4.84 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR024	136
Figure 4.85 : Première composante principale en cumulatif en fonction du temps pour le canal 1 du groupe de lames 1.....	138
Figure 4. 86 : Première composante principale en cumulatif en fonction du temps pour le canal 1 du groupe de lames 2.....	139
Figure 4.87 : Première composante principale en cumulatif en fonction du temps pour le canal 1 du groupe de lames 3.....	139
Figure 5.1 : Bouffant normalisé et largeur de la lame en fonction de la position sur la lame L5CR019	141
Figure 5.2 : GMT et largeur de la lame en fonction de la position sur la lame L5CR022	142
Figure 5.3 : Largeur de la zone d'usure VS variation dimensionnelle le long de la lame L5CR019	143
Figure 5.4 : Ajustement des vis de serrage du docteur pour la machine de papier de Lennoxville.....	144
Figure 5.5 : Évolution de la pression, du bouffant et de la fréquence de crêpe en fonction du temps.....	145
Figure 5.6 : Test au profilomètre laser montrant les 2 zones d'usure distinctes au bout de la lame	146
Figure 5.7 : Distribution des contraintes en bout de lame (La contrainte maximale en z est indiquée par la couleur rouge).....	147
Figure 5.8 : Photo au microscope optique montrant les 2 zones d'usure distinctes au bout de la lame.....	147
Figure 5.9 : Lame de crêpage dans son support	149
Figure 5.10 : Photos au microscope optique montrant des zones d'usure de lames avec des «stick out» différents. La lame de l'image de gauche a un «stick out» plus petit que celle de l'image de droite.....	150
Figure 5. 11 : Paramètres étudiés ; disposition des fenêtres sur Noesis ^{MD}	151
Figure 5.12 : Analyse avec Noesis ^{MD} : paramètres AEWin ^{MD} – Canal 1 – L5CR004.....	153
Figure 5.13 : Analyse avec Noesis ^{MD} : paramètres AEWin ^{MD} – Canal 1 – L5CR003.....	154
Figure 5.14 : Analyse avec Noesis ^{MD} : paramètres AEWin ^{MD} – Canal 2 – L5CR023.....	155
Figure 5.15 : Distribution du niveau RMS des signaux durant le crêpage par la lame L5CR023	156
Figure 5.16 : Analyse des phases d'usure pour le canal 1 de la lame L5CR003.....	159
Figure 5.17 : Évolution du bouffant, de la fréquence de crêpe et du paramètre d'émission acoustique RMS en fonction du temps pour la lame L5CR003	160
Figure 5.18 : Évolution du bouffant, du BLAH et du paramètre d'émission acoustique de la lame L5CR023.....	161
Figure 5.19 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR003.....	162
Figure 5.20 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR019.....	162
Figure 5.21 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR022.....	163
Figure 5.22 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR023.....	163
Figure 5.23 : Classement des différents tests d'émission acoustique (Canal 1) selon la qualité du papier produit et la date du test.....	165
Figure 5.24 : Schéma d'un réseau de neurones	167

Figure 5.25 : Schéma de l'interface de design du logiciel Peltarion Synapse ^{MD} pour le réseau utilisé	169
Figure 5.26 : Évolution de la fréquence moyenne des signaux d'émission acoustique en fonction du temps pour la lame L5CR023.....	171
Figure 5.27 : Évolution du niveau RMS des signaux d'émission acoustique en fonction du temps pour la lame L5CR023	171
Figure 5.28 : Évolution du bouffant du papier produit en fonction du temps pour la lame L5CR023	172
Figure 5. 29 : Comparaison entre la sortie et la cible pour la lame L5CR023 pour l'apprentissage du réseau de neurones.....	173
Figure 5.30 : Graphique de la distribution de l'erreur pour la sortie du réseau de neurones en mode apprentissage (Lame L5CR023)	173
Figure 5.31 : Comparaison entre la sortie et la cible pour la lame L5CR019 pour la validation du réseau de neurones.....	174
Figure 5.32 : Graphique de la distribution de l'erreur pour la sortie du réseau de neurones en mode apprentissage (Lame L5CR023)	175

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Paramètres définissant la qualité du papier [Kruger Produits ltée, 2006]	17
Tableau 2.2 : Propriétés de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 [Binet et coll., 2006]	19
Tableau 2.3 : Composition chimique de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 [Binet et coll., 2006]	20
Tableau 2.4 : Sources d'émission acoustique lors de la friction entre deux solides [Baranov et coll., 2007]	39
Tableau 2.5 : Contenu informatif des paramètres d'émission acoustique dans les métaux [Baranov et coll., 2007]	41
Tableau 2.6 : Liste de certains paramètres temporels [Leblanc, 1999]	44
Tableau 2.7 : Liste de certains paramètres fréquentiels [Leblanc, 1999]	45
Tableau 2.8 : Liste de certains paramètres statistiques [Leblanc, 1999]	46
Tableau 2.9 : Description des différents paramètres d'émission acoustique mesurés et calculés dans le logiciel AEwin ^{MD}	47
Tableau 3.1 : Synthèse des tests effectués à l'usine	57
Tableau 4.1 : Objectifs normalisés à atteindre pour certains paramètres papier pour les grades 1 et 2	66
Tableau 4.2 : Propriétés du grade de papier 2 en fonction du nombre de rouleaux suivant une lame (chaque rouleau représente environ 25 minutes de crêpage)	69
Tableau 4.3 : Descriptions des emplacements des tests de microdureté	82
Tableau 4.4 : Répartition des échantillons.....	92
Tableau 4.5 : Résultats de la perte de matière due à l'usure	98
Tableau 4.6 : Spécifications des échantillons observés au MEB	100
Tableau 4.7 : Largeur de la zone d'usure des lames pour différents temps d'exposition à l'usure	115
Tableau 4.8 : Groupes de lames.....	129
Tableau 5.1 : Propriétés du papier normalisés et des lames pour les deux premiers échantillons tirés des lames L5CR018 et L5CR019	148
Tableau 5.2 : Données sur l'aire sous la courbe du RMS et de la fréquence moyenne pour chaque test effectué pour le canal 1	164

1. INTRODUCTION

1.1 Motivation et contexte

Le procédé de crêpage est une étape importante de la chaîne de fabrication du papier tissu de type hygiénique, celui-ci a un impact majeur sur la qualité du papier obtenu en terme de douceur et texture. Cette étape consiste à détacher la feuille de papier d'un cylindre de séchage (yankee) tournant à grande vitesse pour ensuite pouvoir enrouler ce papier crêpé sur de grands rouleaux. Ce processus est directement dépendant des interactions entre la feuille, l'adhésif, la surface du yankee, la lame et les variations de température. En conséquence, afin d'améliorer l'opération de crêpage en tenant compte des exigences de qualité du papier, une approche multidisciplinaire est requise. Cette approche implique l'intégration des connaissances sur le procédé de fabrication, le matériau des lames, les mécanismes induits lorsque les surfaces sont en contact dynamique et enfin le traitement des signaux d'émission acoustique dus à l'usure par friction. C'est dans l'optique de mieux comprendre les facteurs qui influencent le crêpage que cette étude a été menée.

Étant donné l'aspect industriel de la question et la chaude lutte que se livrent les fabricants de papier hygiénique, il existe très peu de recherches dans la littérature qui s'attardent au procédé de crêpage. Cependant quelques auteurs s'y sont attardés. C'est notamment le cas de Wes McConnel et de John Sitt des laboratoires Buckman qui s'intéressent respectivement à la science du crêpage du papier et aux facteurs qui influencent les paramètres de qualité du papier [McConnel, s.d.] et l'adhésion du papier à la surface du yankee [Sitt, 2003]. Freti et Erickson, de *BTG Pulp & Paper Technology AB*, se penchent quant à eux sur les lames de crêpage et les supports de lame utilisés et leur implication dans le procédé [Freti et coll., 1999]. Ramasubramanian et Shmagin se penchent de leur côté, sur l'effet de la pression de la lame sur le yankee, de l'adhésif et des angles de crêpage sur la qualité du papier [Ramasubramanian et coll., 2000].

Le suivi par émission acoustique sert, quant à lui, à suivre en temps réel le comportement du matériau sous contraintes. L'émission acoustique apparaît présentement comme la seule technique parmi les méthodes de contrôle non destructif pouvant répondre au problème posé permettant un contrôle en temps réel durant le procédé de crêpage. En ce qui concerne cette étude, l'émission acoustique est générée par le frottement de surfaces

en contact. Bien qu'il n'existe pas dans la littérature d'études concernant le suivi du procédé de crêpage à l'aide de la technique utilisant l'émission acoustique, il n'en reste pas moins que plusieurs chercheurs se sont attardés au suivi de l'usure de pièces en frottement ou d'outils de coupe à l'aide de cette technique. Ces études peuvent alors servir de base pour transférer ces travaux au procédé de crêpage. Les travaux de Belas traitent entre autres de l'évaluation de l'usure d'un couple de friction par la méthode de l'émission acoustique et montre qu'il est possible d'estimer l'intensité de l'usure [Belas, 2001]. Les recherches de Sun, Wood et Wang discutent quant à elle du contrôle de l'usure par émission acoustique et par les technologies électrostatiques et elles montrent qu'il est possible de relier l'information extraite des signaux d'émission acoustique au coefficient de friction et ainsi à l'usure [Sun et coll., 2003]. D'autres portent sur l'étude du comportement en usure de systèmes de test composés de tiges ou de billes frottant sur un disque tournant à l'aide de la méthode d'émission acoustique [Hisakado et coll., 1998], [Mechefske et coll., 2002]. Il existe aussi une multitude de recherches qui s'attardent sur l'étude de l'état des outils de coupe à l'aide de la méthode d'émission acoustique [Varma et coll., 2002], [Ravindra et coll., 1997]. Ces études ont permis de montrer qu'il est possible de suivre l'usure d'outils de coupe en temps réel et ainsi de prévoir des défaillances possibles.

Aucune étude non confidentielle portant sur le procédé de crêpage et sur le suivi de l'usure en temps réel des lames de crêpage n'a été faite jusqu'à présent afin de faire la lumière sur l'effet des différents paramètres sur le procédé. Dans cette optique, la compagnie Kruger Produits Ltée a fait appel à l'Université de Sherbrooke afin de l'aider dans ce domaine. À la suite de rencontres avec l'industrie il a été convenu que les différents objectifs relatifs à ce projet étaient les suivants :

1. Évaluer la technique d'émission acoustique afin de suivre en temps réel le comportement mécanique et l'état d'usure de la lame de crêpage (recrêpage)
2. Identifier les paramètres mécaniques et acoustiques qui ont une influence sur la douceur et la texture du papier
3. Identifier les paramètres pertinents de qualité du papier
4. Comprendre les mécanismes de friction et d'usure de la lame de crêpage en relation avec la structure métallurgique de la lame

5. Établir une corrélation entre le comportement mécanique de la lame, la structure métallurgique du matériau, les conditions de crêpage du papier et les paramètres indicateurs de la qualité du papier.

L'atteinte de ces différents objectifs va servir à mieux comprendre le procédé de crêpage et va permettre d'élaborer des actions à poser afin d'améliorer la qualité du papier produit par l'entreprise.

1.2 Objectif et approche

Comme mentionné dans la partie précédente, l'objectif du projet est de mieux comprendre les phénomènes reliant la qualité du papier à l'état d'usure des lames de crêpage. Pour ceci, on propose d'utiliser une méthode expérimentale basée sur les techniques de mesure par émission acoustique afin de suivre en temps réel le comportement mécanique et l'état d'usure des lames. Ce suivi en temps réel doit permettre d'identifier par émission acoustique les mécanismes reliés à l'usure des lames par friction et d'établir une corrélation entre le comportement mécanique de la lame et les différents paramètres de qualité du papier.

Afin d'obtenir des données statistiquement fiables et représentatives cette étude sera réalisée sur plusieurs lames de crêpage utilisées en usine. L'ensemble des données recueillies sera alors regroupé et des outils statistiques qui font appel à la classification des signaux d'émission acoustique (EA) seront utilisés afin de déterminer les corrélations existantes entre les paramètres de qualité du papier et de comportement mécanique de la lame.

Ainsi, des échantillons de papier sont recueillis tout au long des essais sur les lames. La prise de ces mesures a donc pour objectif d'établir des corrélations entre les différents paramètres papier, d'évaluer l'évolution des différents paramètres en fonction du temps pour une même lame ou pour un même rouleau, de suivre l'évolution de la qualité du papier selon la position de l'échantillon sur la largeur de la lame et enfin d'établir des corrélations avec l'émission acoustique et l'état d'usure de lame.

D'un autre côté, toutes les lames utilisées lors des tests sont récupérées et identifiées. Le but de cet exercice est de pouvoir réaliser une étude métallurgique afin d'évaluer les propriétés mécaniques et les variations microstructurales induites par les mécanismes

d'usure que subissent les lames lors du frottement contre le yankee. C'est pour cette raison que des lames avec des temps d'usure relativement différents sont choisies. Il est alors possible de quantifier l'usure subie par la lame et d'identifier son type et ce, pour des temps d'exposition à l'usure différents. Pour ce faire, des tests de dureté, de microdureté, des mesures de dimensions des lames, des analyses au microscope électronique à balayage et au microscope optique ainsi qu'une analyse par éléments finis sont réalisés. Les résultats de ces analyses et de ces tests a pour but d'évaluer l'état des lames et de corréler les résultats obtenus avec la qualité du papier et l'émission acoustique.

Pour ce qui est des tests d'émission acoustique sur les lames, ils sont conduits durant l'opération normale du procédé de crêpage en usine. Deux capteurs piézoélectriques avec des fréquences de résonance de 500 kHz sont fixés à chacune des extrémités de la lame de crêpage. Les signaux d'émission acoustique captés en temps réel sont numérisés et enregistrés en format ASCII par le système d'acquisition des données microDisp^{MD} (Physical Acoustics Corporation). Ensuite, des paramètres sur les signaux sont mesurés et calculés par AEwin^{MD}, un logiciel capable d'extraire sur les signaux plusieurs paramètres dans les domaines temporel, fréquentiel et statistique. Les paramètres d'émission acoustique calculés par le système sont analysés sous la forme de distribution en fonction du temps de crêpage. Des projections des paramètres sont aussi réalisées ainsi qu'une analyse en composantes principales des données acoustiques. Enfin les paramètres analysés sont corrélés aux données papier et aux données métallurgiques reliées aux lames usées.

Tous ces tests permettent de faire la lumière sur les facteurs qui influencent la qualité du papier produit dans le cadre du procédé de crêpage.

1.3 Organisation du mémoire

Le mémoire est réparti en cinq chapitres assemblés de manière à présenter l'information suivant une suite logique des étapes effectuées afin de rencontrer les objectifs de l'étude. Le premier chapitre met en évidence le cadre théorique dans lequel s'inscrit la recherche. En premier lieu, il est question de la théorie qui entoure le procédé de crêpage et des paramètres qui l'influencent. Ensuite, une revue bibliographique sur les caractéristiques du papier et sur les lames de crêpage utilisées est réalisée. Finalement, les éléments théoriques concernant le suivi par émission acoustique et le traitement des données

d'émission acoustique sont présentés. Le second chapitre traite de l'approche expérimentale utilisée pour cette étude, et vise à présenter tous les aspects abordés au cours des études expérimentales. Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux de l'ensemble des essais effectués sur le papier, les lames de crêpage et le suivi par émission acoustique. Enfin, le quatrième chapitre présente dans quelle mesure il est possible de synthétiser et d'analyser les résultats obtenus. Le chapitre de conclusion est constitué de la synthèse des résultats obtenus en fonction des objectifs visés, et traite aussi des recommandations qui devraient être suivies afin d'améliorer le procédé de crêpage. Les références bibliographiques ainsi que les annexes sont situées à la suite de ce chapitre.

2. CADRE THÉORIQUE

2.1 Procédé de crêpage

2.1.1 Procédé de crêpage de Kruger Produits Ltée

Les renseignements qui suivent ont été recueillis lors de visites à l'usine et ne sont consignés dans aucun document officiel.

Comme le montre la figure 2.1, il est possible de définir trois zones sur le yankee :

- la zone d'attachement où le papier vient adhérer au yankee par l'application d'un adhésif et par l'utilisation d'un rouleau presseur.
- la zone de crêpage où la lame détache le papier du yankee.
- la zone de nettoyage (*cleaner*) où un jet antiadhésif et une lame permettent d'enlever le surplus d'adhésif et de nettoyer la surface du yankee.

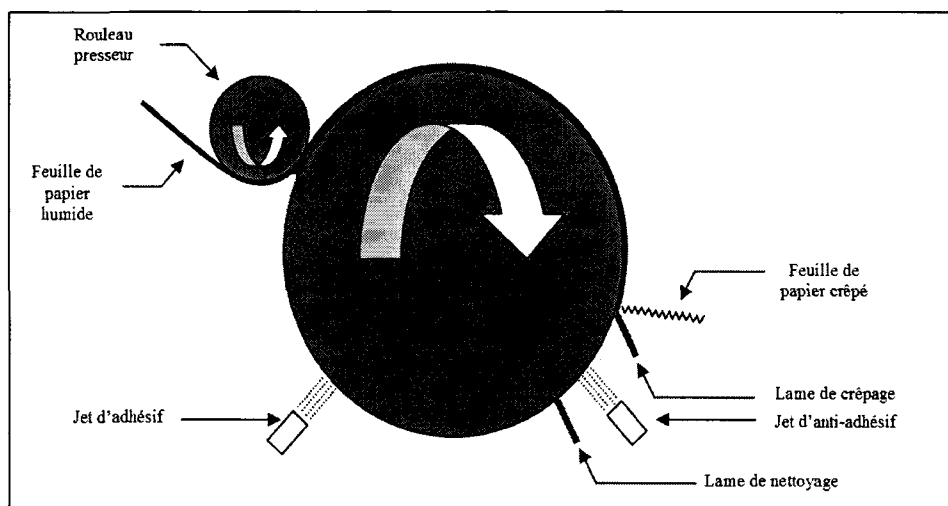


Figure 2.1 : Schéma de la zone de crêpage

Les lames de nettoyage et de crêpage sont changées régulièrement à cause de l'usure provoquée par le frottement avec le yankee. La lame de nettoyage est changée généralement à chaque nouveau rouleau, c'est-à-dire toutes les 20 à 25 minutes alors que la lame de crêpage a une durée de vie très variable. Cette durée de vie dépend de la

qualité du papier. Celle-ci varie entre autres avec la matière première utilisée dans le procédé et la composition de l'eau puisée dans la rivière qui sert à humidifier la pâte. De un à neuf rouleaux peuvent être produits avec une seule lame de crêpage. La décision du changement ou non de la lame se fait par un contrôle visuel des employés de l'usine. Lorsque des stries blanches, apparaissent sur la circonférence du yankee, la lame de crêpage est changée. Ces stries sont le résultat d'un mauvais fonctionnement de la lame dans la mesure où elle ne parvient plus à décoller uniformément le papier du yankee.

Pour vérifier que la qualité du papier se trouve bien dans la gamme prédéfinie pour chaque produit, les employés de l'usine prélèvent des échantillons de papier directement sur les rouleaux embobinés et réalisent des essais afin de mesurer les caractéristiques du papier, ces paramètres seront définis plus loin dans ce rapport. En fonction des résultats des essais, des ajustements de contrôle du procédé sont réalisés dans l'objectif d'atteindre la meilleure qualité possible du papier. Parfois, ces essais permettent de déterminer à quel moment il est préférable de changer de grade de papier ou de lame. Les grades de papier étant des types de papier avec des paramètres prédéfinis.

Le procédé de crêpage, tel que réalisé actuellement, est un procédé efficace. Cependant, dans un objectif d'amélioration de la qualité du produit, il est impératif pour la compagnie d'acquérir un savoir-faire qui permettra un contrôle optimal des paramètres mis en jeu et une évaluation continue de l'usure de la lame durant le processus du crêpage. L'étude théorique et expérimentale présentée dans ce rapport a pour objectif d'approfondir les connaissances sur les mécanismes, d'identifier les facteurs qui influencent la qualité du papier, d'évaluer par surveillance continu l'état d'usure de la lame de crêpage et de corréler cet état avec la qualité du produit.

2.1.2 Définition du crêpage

Lors de la fabrication du papier, une des étapes indispensable à maîtriser est le procédé de crêpage ; c'est cette étape qui confère au papier ses caractéristiques futures telles que sa douceur, son épaisseur et sa résistance à la traction. L'étape du crêpage débute lorsqu'une feuille de papier, constitué de 45% de fibres et de 55% d'eau, est transférée sur un énorme cylindre chauffé fait de fonte, appelé yankee. La chaleur qu'il dégage assèche la feuille de papier, qui ne contient alors plus que 5% d'eau [Binet et coll., 2006]. Un adhésif est diffusé sur le cylindre afin d'assurer le contact entre la feuille et le yankee au niveau du rouleau presseur. Une lame, dite lame de crêpage, dirige la feuille vers des

rouleaux en acier où elle est enroulée pour former une grosse bobine mère. Cette lame, en acier inoxydable martensitique du type AISI 420, frotte sur le cylindre et décolle le papier, surmontant ainsi les forces adhésives qui collent le papier à la surface (figure 2.2). La lame permet aussi de générer, par une action compressive sur le papier, la structure typique des crêpes. C'est cette structure qui donne au papier ses propriétés (douceur, épaisseur, etc.) [Freti et coll., 1999]. La figure 2.2 montre le procédé de crêpage du papier ainsi que les angles définissant la géométrie du bout de la lame.

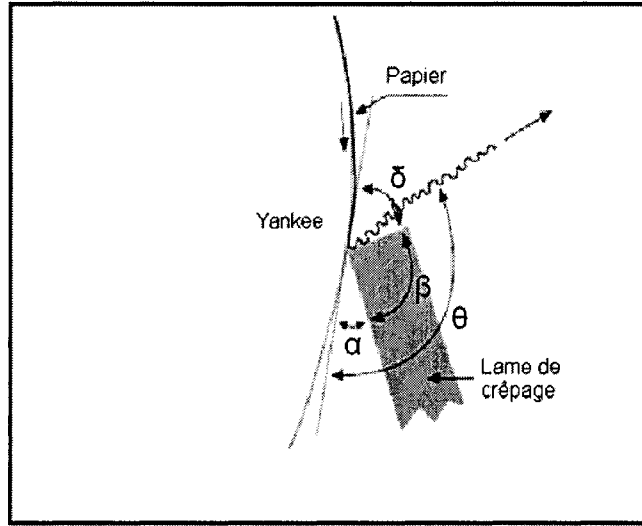


Figure 2.2 : Procédé de crêpage

2.1.3 Paramètres influençant la qualité du crêpage

De nombreux paramètres influent sur la qualité du crêpage : l'adhésif entre le yankee et le papier, l'angle formé entre la lame et le cylindre, la vitesse de rotation du cylindre ou encore la pression exercée sur la lame en sont quelques-uns. Le contrôle adéquat et l'optimisation de ces paramètres ont un impact majeur sur l'amélioration de la qualité du papier. Dans la littérature, plusieurs études se sont intéressées à analyser l'impact des paramètres de contrôle sur le procédé de crêpage. Ci-dessous, la liste de certaines caractéristiques qui influencent le crêpage généralement utilisées dans l'industrie est présentée.

i. Pression du docteur

Le docteur est le support de la lame de crêpage. Il sert entre autre à soutenir la lame et à appliquer une pression linéaire par la lame sur la longueur du yankee afin de bien décoller le papier. La pression linéaire appliquée par le bout de la lame sur le yankee se trouve dans la gamme suivante : 1500 N/m à 3500 N/m [Freti et coll., 1999]. C'est cette pression qui est à l'origine des phénomènes de frottement et de déformation de la lame. Lors du procédé de crêpage, le frottement relatif entre le yankee et la lame induit une certaine usure de la lame. Cette usure provoque une augmentation de l'aire de contact entre les deux corps et, de ce fait, une diminution de la pression surfacique [Freti et coll., 1999]. Ce changement de pression surfacique est à l'origine d'une modification de la qualité du papier ; il est donc important de contrôler ce paramètre.

ii. Géométrie de la pointe de la lame

La structure des crêpes dépend de la position de la lame face au yankee et des paramètres angulaires du bout de la lame (Figure 2.2). Les angles définissant cette géométrie sont les suivants :

a) L'angle d'usure par frottement, α , est l'angle de contact entre le yankee et la lame. Cet angle varie entre 15° et 35°. Il est préférable d'utiliser un angle faible afin d'éviter d'endommager le yankee [Freti et coll., 1999].

b) Le biseau, β , est un paramètre du design de la lame (valeur minimum de 45° pour l'acier et de 75° pour les lames en céramiques).

c) L'angle résultant, δ , appelé angle de crêpage est l'angle qui détermine la qualité de la structure de crêpe. En augmentant cet angle, ce qui revient à diminuer α ou β , on obtient une plus grande douceur et une fréquence de crêpe plus élevée [Freti et coll., 1999], [Ramasubramanian et coll., 2000]. La figure 2.3 schématise l'influence de l'angle de crêpage sur la finesse de la structure des crêpes.

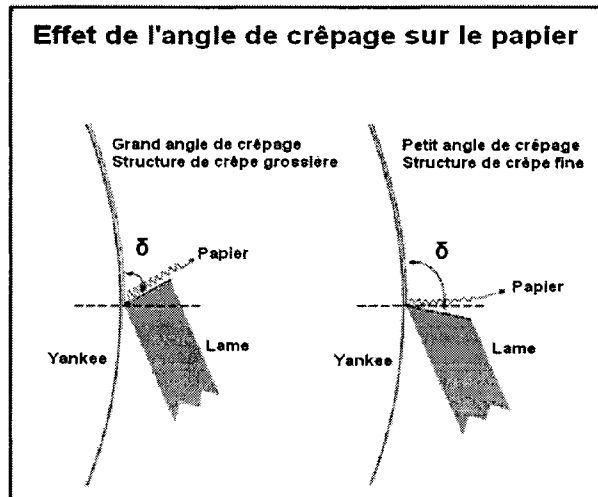


Figure 2.3 : Effet de l'angle de crêpage sur la qualité des crêpes

iii. L'adhésif

Le rôle premier de l'adhésif est d'assurer la cohésion entre la feuille de papier et le yankee. Il sert aussi de protection au yankee contre l'usure causée par le frottement de la lame. L'adhésif utilisé est une résine de réticulation polyamide avec de l'épichlorohydrène [Kruger Produits Ltée, 2006]. Cet adhésif forme une couche imperméable sur le tambour. La qualité du papier est reliée en partie à la manière dont la feuille adhère à la résine. Avec un collage en seulement quelques points, la lame décolle le papier en faisant des crêpes plutôt grossières, le papier obtenu n'est donc pas très doux (Figure 2.4a). Si par contre la surface d'adhésion est plus élevée, cela se traduit par le flambage de la feuille et la formation de microcrêpes, ce qui donne douceur et épaisseur au papier [Sitt, 2003]. Dans les conditions idéales de fabrication du papier, la feuille adhère uniformément au yankee et le contact entre le papier et la lame de crêpage forme de petites colonnes. L'énergie mécanique de ce contact est dissipée dans la feuille, ce qui provoque l'explosion de sa structure en petites colonnes, qui augmente ainsi son volume et par conséquent réduit sa densité (Figure 2.4b).

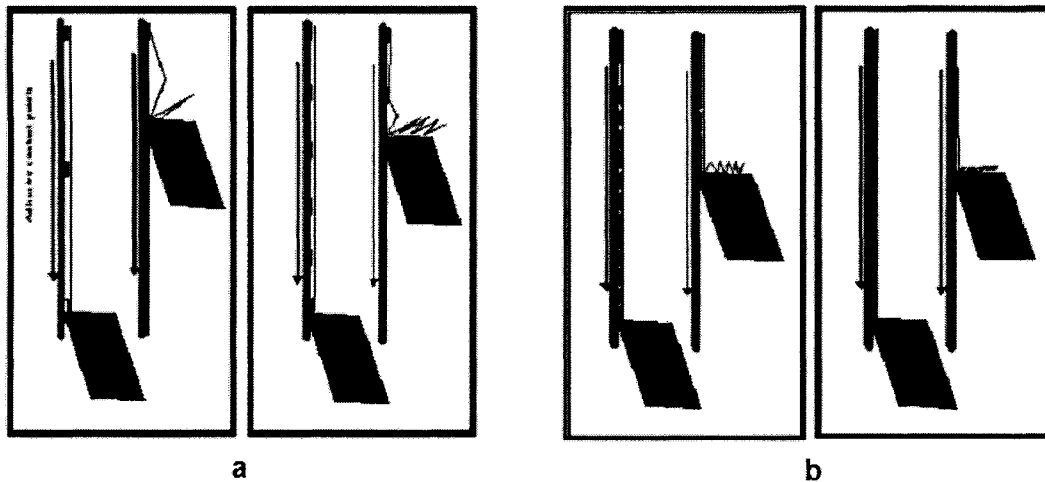


Figure 2.4 : Exemple de mauvaise (a) et bonne adhésion (b)

De plus, la balance entre la force adhésive et celle de libération qui agit sur le papier se modifie avec l'augmentation de l'usure. Si l'action de la lame est trop diminuée, la feuille risque de rester collée au yankee. Dans cette situation, la seule action possible à envisager est de changer la lame sauf si l'adhésion peut être diminuée. Toute tentative d'augmenter la pression de la lame sur le yankee va mener à diminuer l'angle de contact α en courbant la lame et le papier passera alors sous celle-ci sans être décollé [Freti et coll., 1999].

iv. Transfert de chaleur et conductivité thermique du matériau des lames

Durant le procédé, on mesure des valeurs élevées de température au niveau de la pointe de la lame de crêpage. Cette élévation de température affecte sérieusement l'opération de crêpage et par conséquent la qualité du papier. En effet, la température élevée du yankee en rotation en plus des températures générées par le frottement entre la lame et le yankee induisent de la chaleur qui par conduction thermique est transférée à la lame.

Théoriquement, le flux de chaleur transféré par conduction est proportionnel au gradient de température, à la conductivité thermique du matériau et à l'aire de contact entre la pointe de la lame et le yankee [Çengel, 2003]. En première approximation, ce flux de chaleur obéit à la loi simplifiée de transfert de chaleur :

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Où

Q = flux de chaleur

k = la conductivité thermique du matériau

A = section de conduction de la chaleur

$\frac{dT}{dx}$ = gradient de température à travers la section

Cette équation simplifiée permet de conclure sur l'importance de l'aire de contact entre la lame et la surface du yankee et sur l'impact de la conductivité thermique du matériau des lames. L'échauffement des lames induit par le frottement génère une déformation plastique qui affecte la section de contact lame-yankee et la dureté au niveau de la pointe de la lame. La variation de la section de contact a un impact sur la distribution de pression et sur le transfert de chaleur en bout de lame. L'importance de la déformation plastique dépend de la conductivité thermique du matériau des lames et de la capacité de ce matériau à dégager la chaleur. Ces mécanismes ont une conséquence importante sur la structure des crêpes durant le procédé de fabrication. En résumé, la forte chaleur engendrée à l'arête de la lame a une mauvaise influence sur le procédé de crêpage.

2.2 Caractéristiques du papier

2.2.1 Description de la pâte à papier

La matière première principale qui entre dans la fabrication du papier est la pâte, laquelle est constituée de très fines fibres cellulosiques. Il en existe plusieurs types différents, dont la pâte chimique ou la pâte kraft, la pâte chimico-thermomécanique (PCTM), la pâte mécanique et la pâte de fibres recyclées. L'entreprise Kruger Produits Itée produit sa propre pâte (par exemple, des fibres recyclées aux usines de Hull et de Crabtree, au Québec, et de la pâte mécanique à l'usine de New Westminster, en Colombie-Britannique), ou ils l'achètent à d'autres usines de pâte [Kruger Produits Itée, 2006].

Le procédé de fabrication du papier commence à l'atelier de préparation de la pâte. Selon la nature du produit final (chaque catégorie de papier possède sa propre composition de fabrication), différentes pâtes et différents produits chimiques sont mélangés dans un tritrateur pour former une pâte liquide. Le papier et les rognures récupérés de la

machine à papier et des opérations de transformation sont également ajoutés à la pâte liquide. De l'atelier de préparation de la pâte, la pâte liquide (constituée d'environ 99,7 % d'eau et de 0,3 % de fibres) est pompée dans des raffineurs (qui donnent douceur et résistance aux fibres), puis acheminée dans des réservoirs de stockage de la machine à papier et, de là, vers la caisse d'arrivée de la machine. La pâte liquide contenue dans la caisse d'arrivée est évacuée sous pression par une ouverture contrôlée et se répand sur une toile métallique sans fin. L'eau s'égoutte à travers la toile, et un matelas de fibres se forme à la surface. Il s'agit là de l'étape fondamentale du procédé de fabrication du papier, car celui-ci ne consiste en fait qu'en une « natte » de fibres formée sur une toile métallique à fines mailles à partir d'une suspension aqueuse [Kruger Produits Ltée, 2006].

2.2.2 Modèle théorique du flambage du papier

Afin de comprendre le principe du crêpage du papier, et les mécanismes de flambage des fibres du papier lorsqu'ils sont soumis à des contraintes de compression, on utilise un modèle simple [McConnel, s.d.]. Le modèle, représenté par la figure 2.5, considère une unité de papier non crêpé, de longueur L_0 , d'épaisseur T_0 , et de poids de base BW_0 .

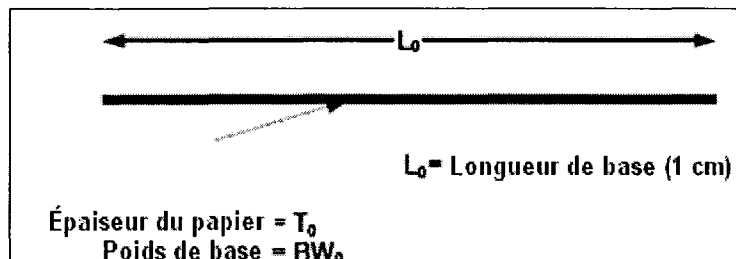


Figure 2.5 : Unité de papier non crêpé

Lors du procédé de crêpage, cette longueur de papier est soumise à des charges de compressions qui induisent une déformée de la feuille en flambage. Soit L , la nouvelle longueur du papier crêpé, b , l'épaisseur due au flambage (Figure 2.6). En réalité, l'amplitude b de la déformée en flambage représentée par la figure correspond à l'amplitude du premier mode de flambage de la feuille.

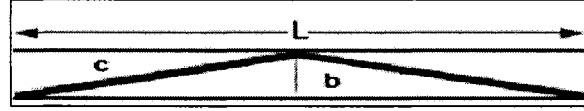


Figure 2.6 : Papier après flambage

Le procédé de crêpage modifie la structure du papier. Le poids final BW donné par l'équation 2.2 est directement proportionnel au rapport de la longueur initiale L_0 sur longueur finale L . L'épaisseur b est donnée par l'équation 2.3. Ce premier mode de flambage est représenté par une fréquence égale à l'unité appelée fréquence de crêpe. Il est à noter que cette fréquence est une fréquence spatiale et non une fréquence temporelle. Elle peut donc se comparer à une longueur d'onde.

$$BW = \frac{L_0 BW_0}{L} \quad (2.2)$$

$$b = \frac{1}{2} \sqrt{L_0^2 - L^2} \quad (2.3)$$

Ce modèle représentatif est appliqué à des fréquences de crêpes plus élevées comme le montre la figure 2.7.

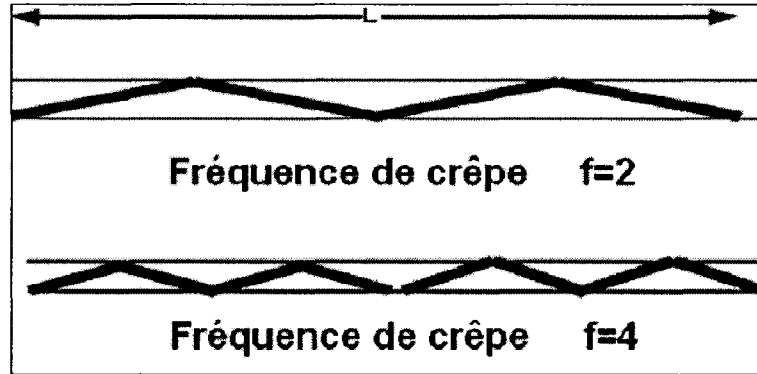


Figure 2.7 : Modèle pour différentes fréquences de crêpes

Il existe une relation entre l'épaisseur due au flambage ou amplitude de déformée en flambage, la fréquence de crêpes et la longueur des crêpes. Il est donc possible de déterminer l'épaisseur en fonction de la longueur des crêpes et de la fréquence (équation 2.4 et Figure 2.8).

$$b = \frac{1}{2f} \sqrt{L_0^2 - \left(1 - \frac{L}{L_0}\right)^2} \quad (2.4)$$

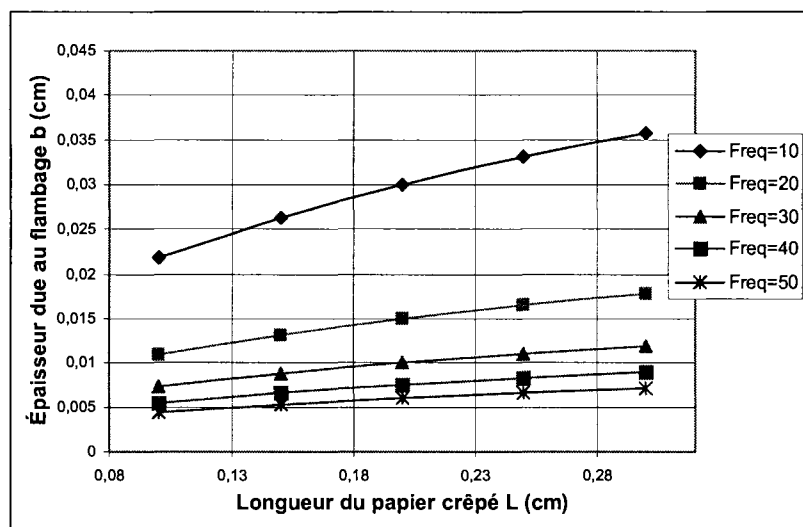


Figure 2.8 : Évolution de l'épaisseur due au flambage en fonction de la longueur du papier crêpé pour différentes fréquences de crêpes

Sur cette figure, il est possible de tirer deux conclusions générales : lorsque la fréquence de crêpes augmente, l'épaisseur diminue et lorsque la longueur des crêpes augmente, l'épaisseur augmente. D'après ce modèle, une meilleure qualité du papier est synonyme d'épaisseur et de fréquence de crêpes faibles. Puisque ces paramètres sont inversement proportionnels, selon l'équation 2.4, il est nécessaire de trouver un compromis. Cependant, les relations montrées sur la figure 2.8 sont difficilement vérifiées expérimentalement et ne peuvent être utilisées uniquement que comme indicateur des tendances de qualité du papier. En effet, les résultats expérimentaux collent rarement à la théorie et certains phénomènes dans le crêpage tendent à éloigner les résultats obtenus en entreprise de ceux obtenus avec la théorie. Dans le modèle théorique, la feuille de papier est considérée comme plate et uniformément collée au yankee, or en réalité celle-ci a une certaine épaisseur. Cette non uniformité entraîne une non uniformité dans le crêpage. De plus, la théorie ne considère pas l'évolution des dimensions de la feuille de papier au niveau microscopique lorsque la fréquence de crêpe augmente.

La figure 2.9 montre l'évolution du rapport Longueur de crêpe sur bouffant en fonction de la fréquence de crêpe [McConnel, s.d.]. Sur cette figure, l'épaisseur du papier non crêpé est prise en compte, on ne parle alors plus d'épaisseur du papier mais de bouffant qui est en fait l'épaisseur totale de la feuille. Elle montre la relation qui existe entre la fréquence de crêpe et le rapport Longueur de crêpe sur bouffant.

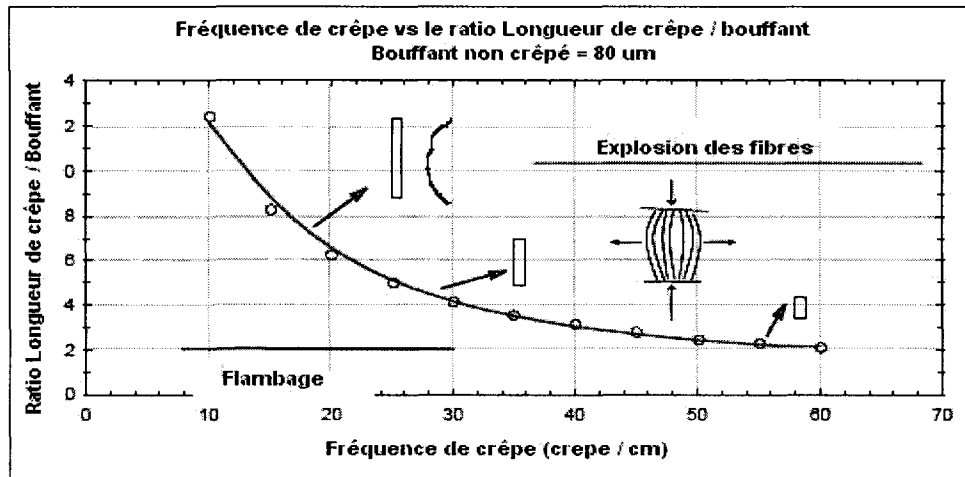


Figure 2.9 : Relation entre le ratio (Longueur de crêpe / bouffant) en fonction de la fréquence de crêpe [McConnell, s.d.]

Lorsque la fréquence de crêpe est faible, la longueur de crêpe est plus grande que l'épaisseur de la feuille et le papier peut courber ou flamber. La figure 2.9 montre qu'à partir d'une fréquence de crêpe de 30 crêpes/cm, les fibres de la feuille explosent dans la direction z ce qui amène à une dédensification du papier. Cette dédensification est accompagnée d'une augmentation de l'épaisseur, d'une chute de la résistance à la traction ainsi que d'une augmentation de la douceur et de la quantité d'espace vide. Lorsque les valeurs se situent dans cette région, la feuille de papier peut doubler voire tripler en quantité d'espace libre [McConnel, s.d.]. La figure 2.10 montre les résultats des différents modes de flambage en relation avec l'augmentation du bouffant.

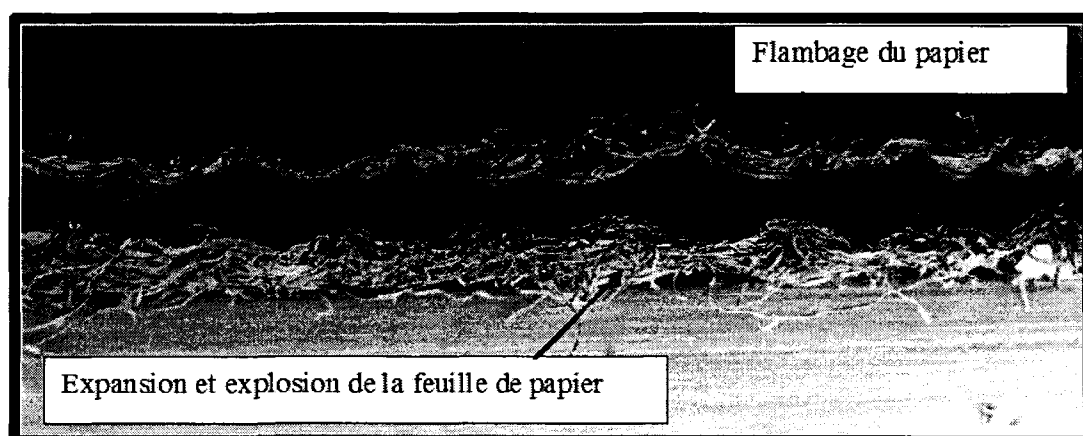


Figure 2.10 : Mode de rupture des fibres [McConnell, s.d.]

C'est donc dans la zone d'explosion des fibres que les propriétés du papier sont les plus intéressantes. Pour des soucis de qualité et de rentabilité, il est donc primordial de travailler dans une gamme de fréquences élevées pour se retrouver ainsi dans la zone d'explosion des fibres.

2.2.3 Paramètres de qualité du papier

Dans l'industrie, plusieurs paramètres permettant de vérifier la qualité du papier sont mesurés et exploités afin d'optimiser la production. Ces paramètres permettent de suivre l'évolution de la qualité du papier afin d'identifier l'instant idéal pour changer de lame ou tout simplement pour savoir dans quel grade le papier se trouve. Le tableau 2.1 permet de classer les différents paramètres qui définissent la qualité du papier après le crêpage.

Tableau 2.1 : Paramètres définissant la qualité du papier [Kruger Produits ltée, 2006]

Paramètre	Définition	Unité	Gamme, Incertitude	Moyen de mesure
Bouffant	épaisseur d'une feuille de papier non comprimé	μm	168-186 +/- 2.5	Une pression fixe de 1.44 kPa est appliquée sur 12 feuilles. La distance entre les 2 plaques est mesurée puis divisée par douze
FRSM	force de rupture de la feuille dans le sens machine (sens perpendiculaire à la lame et aux crêpes)	g/po	340-480 +/- 25	Test de traction sur quelques feuilles
FRST	force de rupture de la feuille dans le sens transverse (sens parallèle à la lame et aux crêpes)	g/po	130-160 +/- 25	Test de traction sur quelques feuilles
FRH	force de rupture de la feuille humide dans le sens machine	g/po	70-110 +/- 25	Test de traction sur quelques feuilles après les avoir mouillées dans une solution
Douceur		WW S	70-85 +/- 5	Test comparatif de douceur, évaluation subjective au toucher
Blancheur		%	79-85	Mesure de la réflectance lorsque le papier est éclairé par une lumière de 467 nm
Poids	poids surfacique de la feuille de papier sèche	g/m^2	18.7-20.4 +/- 0.3	
Allongement	allongement d'une feuille de papier dans le sens machine avant rupture	%	17-23 +/- 2%	Test de traction

À ces paramètres s'ajoutent ceux qui concernent directement les crêpes, à savoir la longueur de crêpe et le pourcentage de crêpes fines, moyennes, grosses et très grosses. Ces données sont fournies par un capteur de crêpage développé par la compagnie Paprican. Il permet la quantification par imagerie des crêpes dans le sens machine et du côté doux (côté yankee).

Le principe d'analyse du capteur Paprican repose sur le traitement d'images avec l'aide de l'analyse fréquentielle par l'entremise de la transformée de Fourier. La mesure donne directement le pourcentage total des crêpes en fonction de la largeur des crêpes. Un exemple de cette distribution est illustré par la figure 2.11.

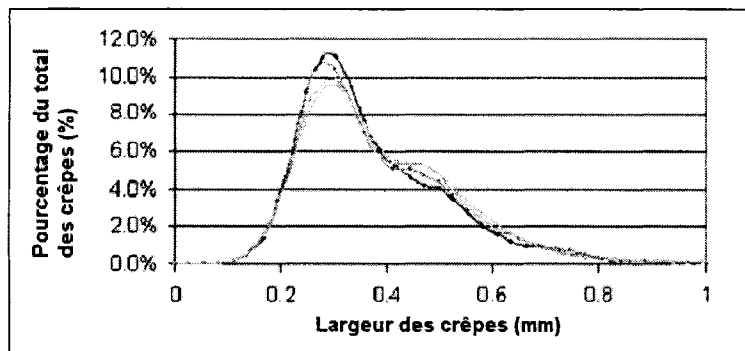


Figure 2.11 : Distribution des crêpes

À partir de cette distribution, on définit arbitrairement cinq classes en fonction du pourcentage de crêpe:

- % crêpes très fines : largeurs de crêpes comprises entre 0,11 et 0,22 mm
- % crêpes fines : largeurs de crêpes < 0,27 mm
- % crêpes moyennes : largeurs de crêpes comprises entre 0,28 et 0,44 mm
- % crêpes grosses : largeurs de crêpes comprises entre 0,45 mm et 0,59 mm
- % crêpe très grosses : largeurs de crêpes > 0,60 mm

En général, on définit un papier avec une grande douceur celui qui présente une distribution la plus étroite et la plus à gauche possible. Cette façon de faire reste toutefois intuitive et ne permet pas un contrôle précis. La qualité optimale du papier dépend aussi du compromis entre la fréquence des crêpes et le bouffant. Car le choix d'une fréquence de crêpes élevée correspond à un bouffant moins élevé et un bouffant élevé correspond à une douceur élevée.

2.3 Lames utilisées

2.3.1 Description de la lame

Les lames utilisées par la compagnie lors du procédé de crêpage sont des lames de 315 cm de long par 12,3 cm de large par 1,5 mm d'épais. Ces dimensions sont celles des lames à l'état neuf (sans avoir été aiguisées). La lame de crêpage doit détacher la feuille de papier du yankee en surmontant les forces adhésives qui retiennent les feuilles à la surface du séchoir. De plus, elle génère la structure typique de crêpe du papier par une action compressive sur celui-ci. En fait, après environ 2 heures d'utilisation, la lame est enlevée afin d'être remplacée par une autre fraîchement aiguisée. La vieille lame passe alors à l'aiguisage pour pouvoir être utilisée ultérieurement. Le matériau de la lame est un acier inoxydable martensitique AISI 420 dont les propriétés sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Propriétés de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 [Binet et coll., 2006]

Densité	7,6 - 7,8 g/cm ³
Dureté Vickers	540-590 HV
Limite ultime à la rupture	1550-1890 Mpa
Limite élastique	1330-1630 Mpa
Élongation à la rupture	5-11 %
Module d'élasticité	195-205 Gpa
Ténacité	21-40 Mpa* m ^{1/2}
Température de fusion	1450°C - 1510°C

Le tableau 2.3 présente, quant à lui, la composition chimique de l'acier martensitique AISI 420.

Tableau 2.3 : Composition chimique de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 [Binet et coll., 2006]

Éléments	Concentration
Fe	84 - 88 %
Cr	12 - 14 %
C	0,15 - 1 %
Mn	0 - 1 %
Si	0 - 1 %
P	0 - 0,04 %
S	0 - 0,03 %

Les lames sont fabriquées par laminage à froid. Cette opération de laminage écrouie le matériau, ce qui augmente ses propriétés mécaniques en général. Ensuite, chaque lame est découpée individuellement dans une grande plaque. Cependant, le fournisseur ne donne pas les détails relatifs au sens du laminage et de la coupe, au nombre de passe de laminage, aux traitements thermiques subis ainsi qu'à la composition précise de la lame. Le matériau du yankee est en fonte, celui-ci est mis en contact par mode surfacique avec la lame qui génère un frottement avec un coefficient de 0,4 [Binet et coll., 2006].

Les conditions d'utilisation et l'environnement des lames utilisées dans cette étude sont données ci-dessous [Binet et coll., 2006]:

- Le revêtement du yankee est un mélange d'adhésif, de modificateurs et d'agents de relâchement.
- L'adhésif le plus commun est une résine de réticulation polyamide avec de l'épichlorohydrène. Le terme réticulation fait référence à la formation de liaisons additionnelles entre les chaînes d'atomes d'une substance polymérisée. Cet adhésif forme une couche imperméable sur le yankee.
- L'enduit appliqué sur le yankee est une des composantes les plus critiques dans le procédé de fabrication du papier. Il consiste en un mélange précis d'adhésifs et d'agents antiadhésifs.
- L'enduit est appliqué sur le yankee via le dispositif d'arrosage qui est situé après la lame de crêpage et avant le rouleau presseur. L'adhésif et l'antiadhésif sont appliqués par le même dispositif. L'adhésif migre rapidement sur la surface chaude du yankee pour se transformer en une couche protectrice. L'agent antiadhésif influence le niveau d'adhésion de la feuille à la surface du yankee.
- La charge du système est légèrement anionique.

- Les fibres de bois sont faites de microfibrilles (petites fibres microscopiques) faites de copeau de molécules de cellulose, lesquelles sont des polymères de glucose. Sur la surface des fibres, il y a des sites réactifs où les fibres adhèrent aux autres à l'aide d'un mécanisme appelé liaison d'hydrogène. De la liaison d'hydrogène dépend l'adhérence de l'eau dans la fibre.
- Présence de contaminants sur la lame provenant des fibres.
- À la hauteur de la lame, le papier a une humidité relative entre 1% et 6%.
- Vitesse linéaire du cylindre : 18 m/s
- Température : 120 °C à 177 °C. Comme la température augmente de façon notable au point de friction, la microstructure de la lame subit inévitablement des modifications et ses propriétés mécaniques en sont affectées.

2.3.2 Mécanismes d'usure de la lame

i. Frottement

Le frottement présent entre la lame et le cylindre provoque inévitablement une dissipation d'énergie qui peut se traduire soit en une transformation de la matière (plastification, transformation structurale, fissuration), en une réaction physico-chimique ou en formation d'un troisième corps (formation de débris, agrégation, broyage, cisaillement). Cette dissipation d'énergie sera exploitée plus tard dans cette étude par la détection et l'analyse des ondes de contraintes correspondantes captées par un détecteur d'émission acoustique. Auparavant et afin de comprendre la dégradation de la lame face au frottement avec le yankee, on donne un rappel fondamental sur les mécanismes sources du phénomène d'usure.

Lorsque deux matériaux sont placés en contact, toute tentative pour faire glisser l'un sur l'autre se heurte à l'opposition d'une force de frottement [Ashby et coll., 1991] (figure 2.12). La force F_s qui est juste suffisante pour provoquer le début du glissement relatif est reliée à la force P normale à la surface de contact par :

$$F_s = \mu_s P \quad (2.5)$$

où μ_s est le coefficient de frottement statique.

Une fois le glissement démarré, la force limite de frottement décroît légèrement, et on peut écrire :

$$F_k = \mu_k P \quad (2.6)$$

où μ_k ($< \mu_s$) est le coefficient de frottement dynamique.

Ces deux phénomènes sont représentés sur la figure 2.12.

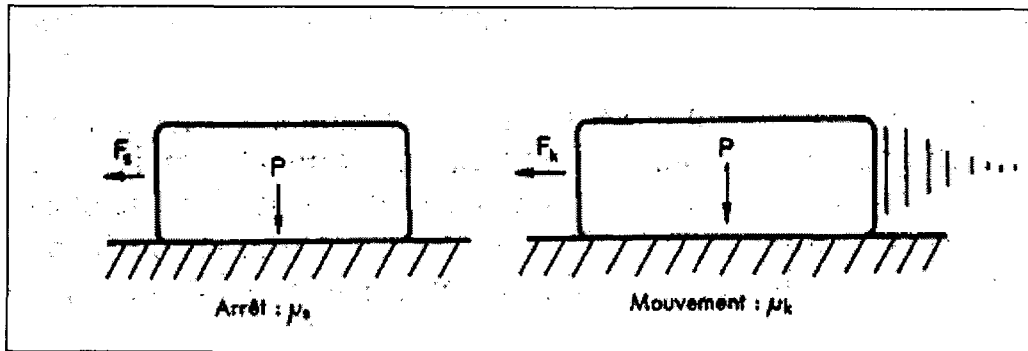


Figure 2.12 : Schéma des frottements statique et dynamique [Ashby et coll., 1991]

Lorsque deux surfaces théoriquement planes sont mises en contact, quel que soit le soin avec lequel elles auront été usinées et polies, elles ne viendront en contact qu'aux endroits où une des séries d'aspérités touchera l'autre. Quelle que soit la charge qui s'applique sur les surfaces, elle est transmise uniquement par les endroits où les aspérités sont en contact, de sorte que seulement une très petite fraction de l'aire nominale de la surface supporte la charge [Ashby et coll., 1991]. Initialement, pour les charges très faibles, les aspérités se déforment élastiquement lorsqu'elles entrent en contact. Néanmoins, pour les charges usuelles, une déformation plastique intense se produit aux sommets des aspérités. Si chaque aspérité s'écrase, formant une jonction à travers la surface de contact, alors la charge totale transmise par la surface vaut (figure 2.13) :

$$P = a\sigma_e \quad (2.7)$$

Où a est l'aire réelle de contact et σ_e est la contrainte d'écoulement en compression.

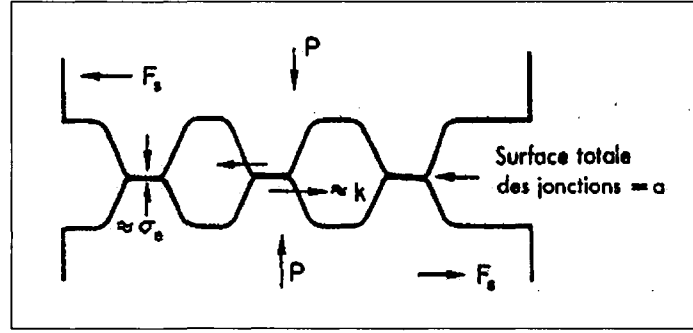


Figure 2.13 : Schéma du contact entre les aspérités [Ashby et coll., 1991]

Si l'on tente de faire glisser l'une des surfaces par rapport à l'autre, ce glissement rencontre la résistance d'une contrainte de cisaillement qui apparaît au niveau des aspérités. Cette contrainte de cisaillement, τ , est maximum là où la section des aspérités est minimum, c'est-à-dire dans les régions où ces aspérités sont en contact. La force résistante qui s'oppose au glissement a pour expression :

$$F = a\tau \quad (2.8)$$

D'autre part, la déformation plastique intense dans les zones de contact presse les sommets des aspérités les uns contre les autres si bien qu'on arrive à un contact intime à l'échelle atomique à travers la surface de contact a . En conséquence, la jonction peut supporter des contraintes de cisaillement de l'ordre de k , où k est la limite d'écoulement en cisaillement du matériau. La force F_g à laquelle le glissement peut débuter est donc :

$$F_g \approx ak \approx a \frac{\sigma_e}{2} \quad (2.9)$$

En combinant ce résultat avec l'équation 2.7, on a :

$$F_g \approx \frac{P}{2} \quad (2.10)$$

Or, ceci n'est rien d'autre que la loi du frottement : $F_s = \mu_s P$ qui vient ainsi d'être déduite des principes de base grâce au modèle de contact des aspérités. Le modèle prévoit aussi que $\mu_s \approx \frac{1}{2}$, ce qui est de l'ordre de grandeur réel des coefficients de frottement statiques entre deux surfaces métalliques.

ii. Stades de la friction dynamique

La friction se divise en six stades distincts [Suh et coll., 1981] (figure 2.14):

- I. Labourage par les aspérités du matériau. Adhésion négligeable (contamination).
- II. Augmentation du coefficient de friction causé par l'adhésion (nettoyage des surfaces). Quand l'interface est lubrifiée, le stade I est plus long et le stade II peut ne pas être présent.
- III. Augmentation rapide du nombre de particules d'usure et augmentation de l'adhésion causé par l'augmentation de la surface des interfaces propres. Le labourage est élevé quand les deux surfaces sont de duretés égales. Les particules d'usure sont générées quand le procédé de formation des particules par les déformations des sous couches, la formation et la propagation de fissures, postulées dans la théorie d'usure de la délamination est complétée.
- IV. Le nombre de particule d'usure reste constant. L'adhésion est constante. Pour les métaux, le stade IV représente la friction en régime permanent.
- V. Le polissage des surfaces dures diminue le labourage et la déformation des aspérités.
- VI. Quand la surface dure devient éventuellement lisse, la surface la plus molle devient aussi lisse.

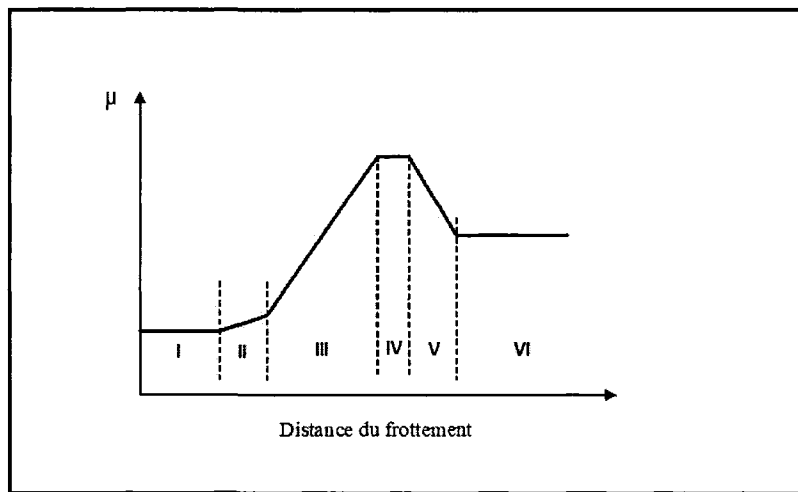


Figure 2.14 : Six stades de la force de friction en fonction de la distance de frottement
(Suh et coll., 1981)

Plusieurs résultats ont été tirés des tests de friction qui ont été conduits au MIT [Jahanmir et coll., 1974] pour étudier les comportements d'usure de certaines combinaisons de

matériaux. Premièrement, le coefficient de friction change en fonction de la distance de frottement, et ce tout spécialement au début du frottement. Le coefficient de friction a normalement une valeur initiale basse qui augmente graduellement jusqu'à l'atteinte d'une valeur en régime permanent. Après l'atteinte du maximum, le coefficient de friction diminue parfois si la dureté de la pièce stationnaire est plus grande que celle du spécimen en mouvement. La même paire de matériau ne montre pas cette chute de coefficient de friction si les rôles sont interchangés. Le coefficient de friction initial est toujours de l'ordre de 0,1 à 0,2 et ce peu importe les matériaux testés et la présence ou non de lubrifiant. En second lieu, le coefficient de friction en régime permanent et les taux d'usure sont plus grands lorsque des métaux identiques frottent l'un contre l'autre que lorsqu'un spécimen stationnaire dur est mis en contact avec un spécimen en mouvement plus mou. Toutefois, lorsqu'un spécimen stationnaire mou est mis en contact avec un spécimen en mouvement dur, les coefficients de friction en régime permanent sont presque égaux à ceux de métaux identiques frottant l'un contre l'autre. Dans ce cas, les taux d'usure de paires de matériaux différents sont beaucoup plus grands que ceux de métaux identiques. Ces changements de coefficient de friction et de comportement d'usure sont directement reliés à la topographie des surfaces.

Le frottement qui survient entre la lame et le yankee est un exemple de frottement dynamique qui provoque inévitablement une dissipation d'énergie qui se traduit en plusieurs formes de transformation. Cette section fera la présentation des différents types d'usure possibles pour la lame et des manifestations de ces types d'usure sur la lame en question.

iii. Usure adhésive

Cette forme d'usure est liée au frottement et se présente lorsque deux corps glissent l'un par rapport à l'autre. Sous l'effet de la chaleur et du déplacement relatif des corps, des microsoudures se forment aux points de contact entre les 2 matériaux et de la matière est arrachée sur un corps au profit de l'autre. Le frottement sec entre la lame et le yankee, l'augmentation de la pression de contact entre les deux et les hautes températures atteintes à l'interface sont autant de facteurs qui peuvent favoriser l'usure adhésive dans le cas qui est à l'étude [Kapsa et coll., s.d.]. Cette forme d'usure peut être décelée grâce à la présence de plusieurs indices. Les déformations plastiques, la taille des grains relativement importante ($\geq 10 \mu\text{m}$) et les agglomérats composites en sont des exemples. Cependant, le transfert de matière du corps le plus tendre vers le corps le plus dur est

l'indice le plus flagrant de la présence d'usure adhésive sur une pièce. La figure 2.15 montre le phénomène élémentaire de l'usure adhésive.

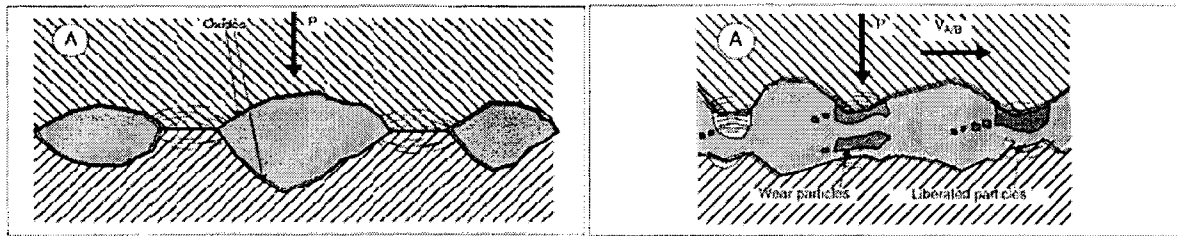


Figure 2.15 : Phénomène élémentaire de l'usure adhésive [Kapsa et coll., s.d.]

L'usure adhésive s'explique par le fait que la pression exercée sur la lame met cette dernière en contact avec le yankee. Comme le coefficient de friction entre les deux matériaux est relativement élevé, il y a adhésion des deux surfaces. Cette adhésion a pour conséquence d'introduire une force de cisaillement visant à séparer les surfaces. Or, toute force de cisaillement produit un écrouissage qui crée un accroissement de la plasticité aux jonctions. Cette déformation plastique s'observe facilement sous forme de dents au niveau de la lame. La lame est donc écrasée et retroussée légèrement vers le haut et vers le bas. La figure 2.16 montre ce phénomène pour une lame testée en usine en décembre 2005.

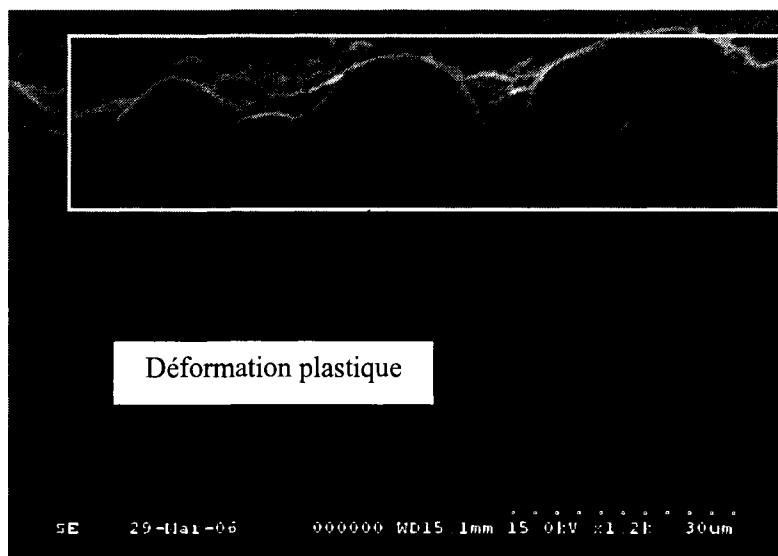


Figure 2.16 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant la déformation plastique

La plasticité aux jonctions s'étend rapidement et peut résulter en une zone d'adhésion totale. Les interfaces peuvent alors se rompre de façon adhésive ou de façon cohésive. Plus la matière molle sera écrasée au point de contact, plus la particule adhérent au yankee sera grosse [Kapsa et coll., s.d.]. Ce sont ces transferts de matériaux du corps le plus mou (la lame) vers le corps le plus dur (le yankee) qui expliquent la perte de matière et donc l'usure. On peut facilement voir ces zones d'enlèvement de matière sur la figure 2.17 qui représente la zone d'usure d'une lame testée en usine en décembre 2005.

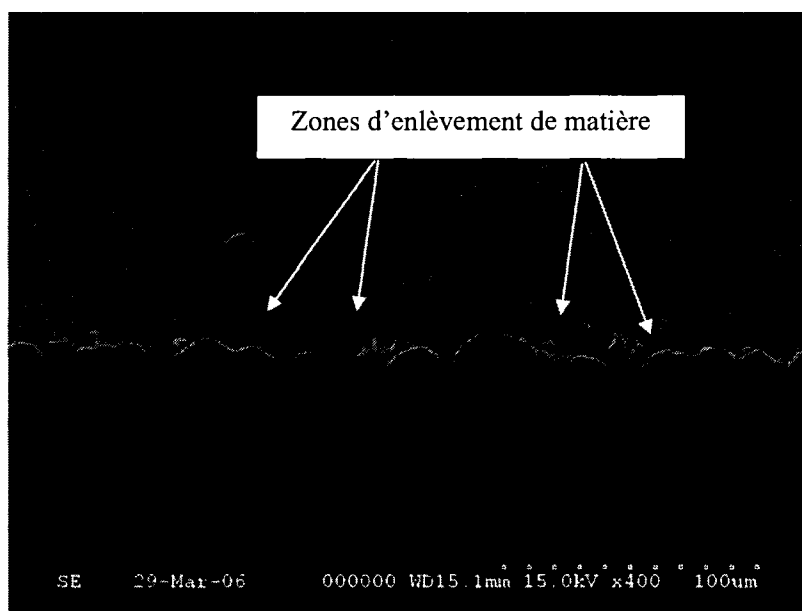


Figure 2.17 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant l'usure par adhésion

iv. Usure abrasive

L'usure abrasive apparaît lorsqu'un corps dur déforme plastiquement un corps plus mou. Des sillons sont alors formés parallèlement à la direction du déplacement par les aspérités du corps le plus dur. Une telle usure est favorisée par une température et une humidité relative élevée [Kapsa et coll., s.d.]. L'environnement dans lequel la pièce évolue est donc propice à cette forme d'usure. Deux indices peuvent révéler la présence d'usure par abrasion sur une pièce : une surface d'aspect texturé et des rayures parallèles à la direction du déplacement.

Dans le cas étudié, l'usure abrasive résulte directement de l'usure adhésive. En effet, les particules plastifiées de la lame qui ont adhéré au yankee sont plus dures que la lame en soit. Ces particules déforment donc la lame. Des sillons sont alors formés parallèlement à la direction du déplacement par les aspérités du corps le plus dur. Il est également possible que le revêtement du yankee s'use et ne soit pas totalement uniforme. Les protubérances ainsi causées pourraient aussi être à l'origine de l'usure abrasive. Cette cause d'usure reste toutefois hypothétique étant donné que la dureté du recouvrement du yankee n'est pas connue.

Une telle usure est favorisée par une température et une humidité relative élevée. L'environnement de la pièce est donc encore là propice à celle-ci. Les sillons sont facilement observables sur la zone texturée où est également présente l'usure adhésive. Les figures 2.18 et 2.19 montrent bien les signes de l'usure abrasive sur des échantillons de lames testées en décembre 2005.

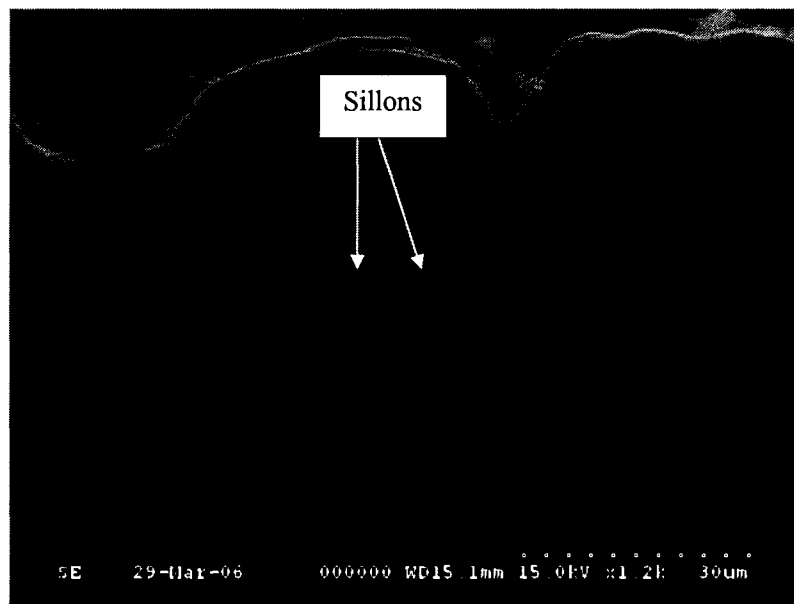


Figure 2.18 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des lignes d'usure abrasive

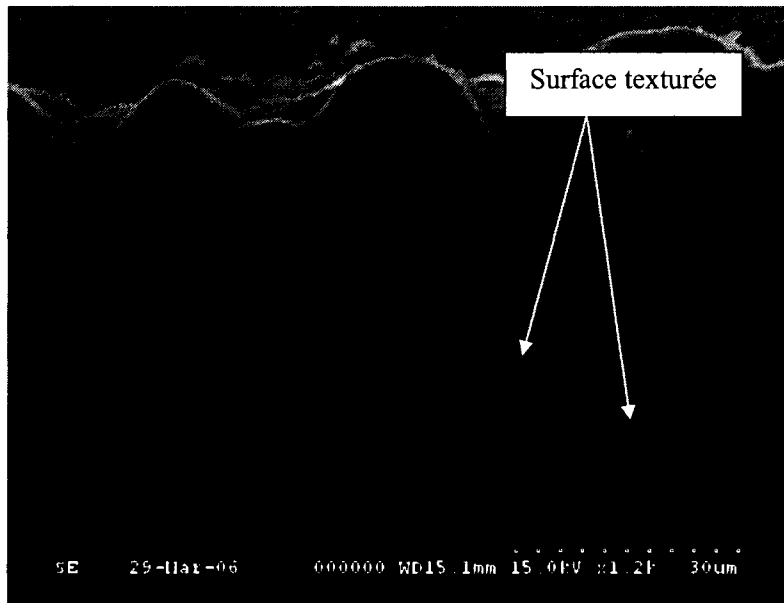


Figure 2.19 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des signes d'usure abrasive

Il est aussi possible d'apprécier la profondeur des sillons causés par l'usure abrasive sur la figure 2.20 où l'on voit une vue de côté des sillons.

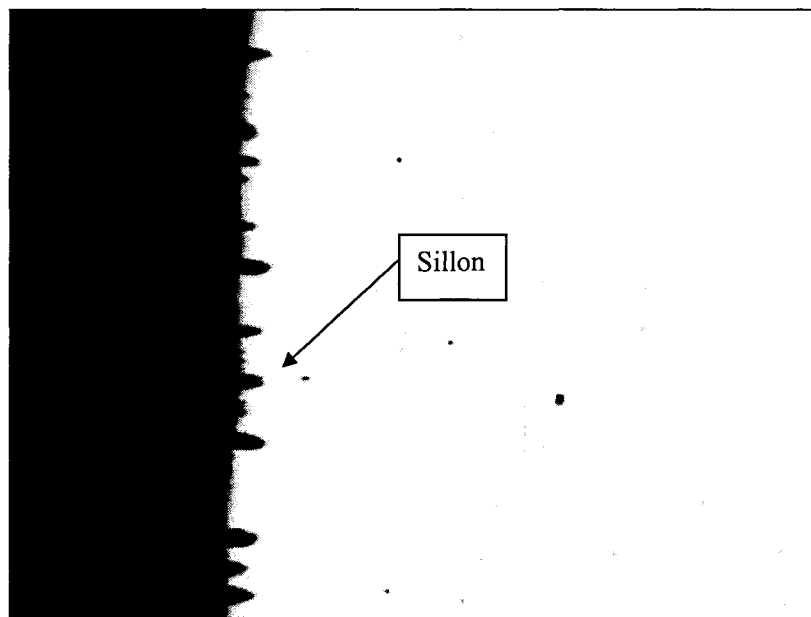


Figure 2.20 : Photo prise avec un microscope optique d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant l'enlèvement de matière par abrasion

v. Usure par impact

La toile de papier est continuellement en train de percuter le biseau de la lame à grande vitesse. Il y a donc des changements significatifs qui se produisent dans la forme de la région de l'impact. Il y a création d'une cannelure longitudinale le long de la lame à l'endroit où la toile de papier percute la lame [Freti et coll., 1999].

Cette usure est similaire à celle de l'érosion que font des particules solides sur du métal. Cette usure substantielle modifie l'angle de crêpage δ , ce qui contribue normalement à détériorer la structure de crêpe. La figure 2.21 montre bien la cannelure formée par l'impact répété de la feuille sur la lame.

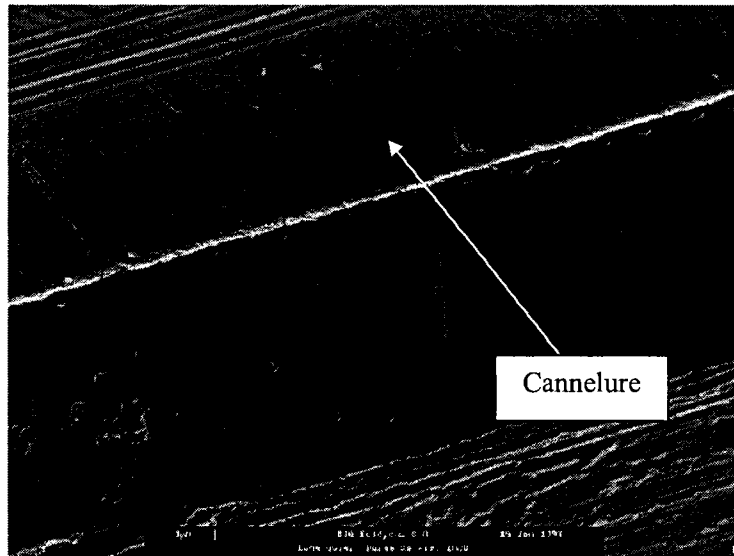


Figure 2.21 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame montrant des signes d'usure par impact [Freti et coll., 1999]

vi. Usure par érosion

Ce type d'usure survient lorsque des pièces sont soumises à un flux liquide qui circule à vitesse élevée. Les indices qui permettent de déceler ce type d'usure sont l'aspect aléatoire des marques d'usure, les traces d'impact, de rayures et de sillons ainsi que des déformations plastiques [Kapsa et coll., s.d.]. Dans le cas qui est à l'étude, il est normalement très facile de distinguer cette usure et ce, sur toute la longueur des lames. Le flux liquide en question est ici la pâte humide et l'adhésif qui sont simultanément décollés de la surface du yankee à grande vitesse. Les figures 2.22 et

2.23 montrent cette forme d'usure sur une lame testée en décembre 2005 où l'on voit un sillon dans lequel se retrouvent des rayures et des traces d'impact disposées aléatoirement. Ce sillon mesure environ 50 microns sur les échantillons qui ont été mesurés.

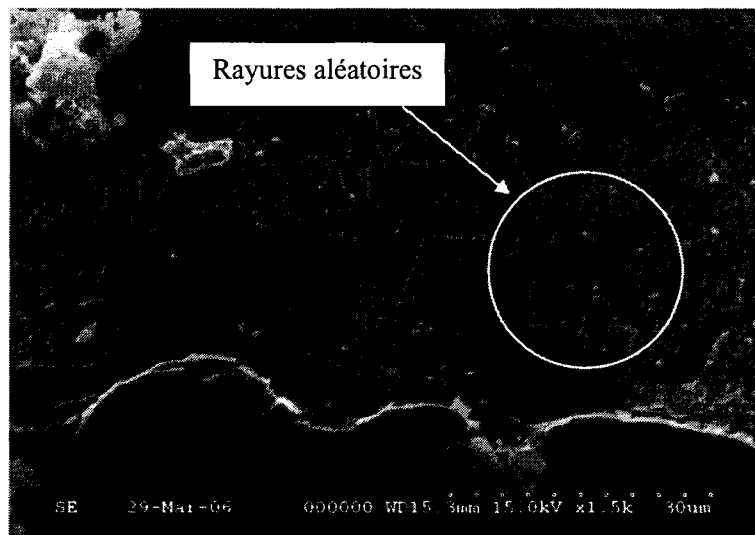


Figure 2.22 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des signes d'usure par érosion

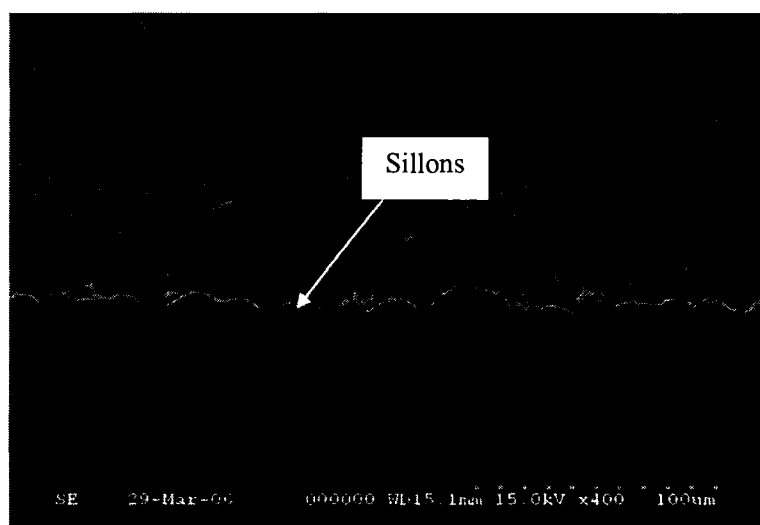


Figure 2.23 : Photo prise avec un microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'une lame testée en usine en décembre 2005 (L5CR001) montrant des sillons dans la zone d'usure

Ces résultats montrent que plusieurs mécanismes d'usure sont générés par le frottement entre la lame et le yankee. Ce sont ces mécanismes qui engendrent la perte de matière de la lame et la diminution de pression surfacique résultant de l'augmentation de la zone de contact entre le bout de la lame et le yankee. Ces variations dimensionnelles de la géométrie de la pointe de la lame induisent une variation de l'angle de crêpage et par conséquent un effet néfaste sur la formation et la texture des crêpes.

2.4 Principe de l'évaluation par émission acoustique

2.4.1 Description générale

Dans ce travail la technique d'émission acoustique (EA) est proposée afin d'évaluer en temps réel les phases d'usure de la lame de crêpage, d'identifier les mécanismes qui sont reliés à la dégradation de la lame par frottement et enfin d'établir une corrélation entre le comportement mécanique de la lame et les conditions de crêpage du papier. L'émission acoustique apparaît présentement comme la seule technique parmi les méthodes de contrôle non destructif pouvant répondre au problème posé permettant un contrôle en temps réel durant le procédé de crêpage. Celle-ci est susceptible de donner des réponses sur la nature des mécanismes engendrant l'usure de la lame, par une exploitation des informations contenues dans les signaux détectés. Les signaux d'émission acoustiques sont porteurs de l'information relative aux sources de frottement qui opèrent durant le contact entre la lame et le yankee. Ainsi, le principal objet de cette étude est d'établir la possibilité de corréler les états générant l'usure de la lame, source d'émission acoustique, aux signaux d'émission acoustique et aux paramètres de qualité obtenus sur le papier final. Cependant, le nombre de signaux d'EA et leur complexité ne facilitent pas cette corrélation, celle-ci dépend de plusieurs facteurs reliés au procédé de crêpage, à la distorsion des signaux reliée aux capteurs utilisés et à la complexité de la propagation des ondes dans des lames minces. Il faut donc reconnaître que cette corrélation ne peut être trouvée que si on se donne des outils de traitement de données multivariées et des outils statistiques permettant de classer les sources d'EA en fonction de l'état de frottement de la lame et en fonction des paramètres de qualité identifiés dans le chapitre précédent.

L'émission acoustique désigne l'onde élastique transitoire libérée spontanément par un matériau sous contraintes à la suite d'un dégagement brutal et localisé d'énergie. Les sources classiques d'émissions acoustiques sont des processus de déformation et de

rupture comme les propagations de fissures, les déformations plastiques et les frottements des surfaces en contact [Pollock, 1989]. Un mouvement soudain dans le matériau produit une onde de contrainte qui se propage dans une structure et qui excite un capteur piézoélectrique de détection. Quand les contraintes dans le matériau augmentent, plusieurs de ces émissions sont générées en même temps et le signal ainsi engendré est capté et amplifié. Grâce aux techniques de traitement des signaux, des paramètres sont calculés pour une analyse ultérieure. Le suivi par émission acoustique sert alors à suivre en temps réel le comportement du matériau sous contraintes.

Le principe de la technique utilisée dans ce travail, consiste à attacher sur la lame un capteur piézoélectrique du type large bande. La chaîne d'acquisition des signaux est composée d'un filtre amplificateur large bande et d'un système de traitement des signaux numériques. Le filtrage permet l'élimination des bruits basses fréquences. Le système de mesure a été programmé afin de calculer des paramètres temporels, fréquentiels et statistiques sur chaque signal enregistré durant la durée de vie de la lame.

Un des avantages majeurs de l'utilisation de l'émission acoustique est qu'elle permet d'inspecter tout le volume de la lame. Il n'est donc pas nécessaire de balayer toute la structure à la recherche de défauts locaux. Il suffit de connecter un nombre approprié de capteurs qui sont typiquement placés à quelques mètres les uns des autres. Cette opération mène à des économies majeures comparativement aux autres méthodes de contrôle non destructif qui requièrent de gros investissements.

2.4.2 Propagation des ondes d'émission acoustique dans les plaques minces

À la surface des plaques minces, comme les lames de crêpage, les ondes acoustiques de volume générées par le frottement subissent de nombreuses réflexions et conversions de modes. Elles se superposent alors durant leur propagation. Ces ondes de surface cheminent de façon indépendante tant que la distance entre les surfaces libres (l'épaisseur de la plaque) est grande devant la longueur des ondes. Lorsque l'épaisseur de la plaque n'est plus très grande, alors les ondes de surface se couplent et se transforment en ondes de Lamb. Les ondes de plaques ou ondes de Lamb correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du

même ordre de grandeur que la longueur d'onde [Techniques de l'ingénieur, 2007]. La figure 2.24 montre un schéma de propagation de telles ondes.

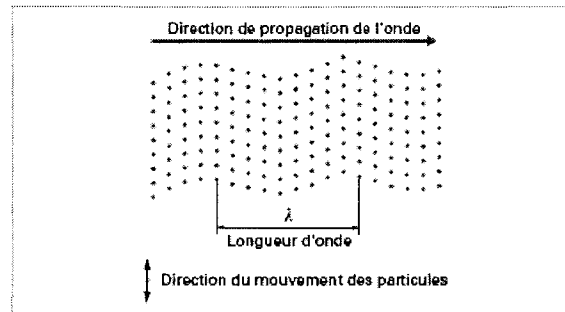


Figure 2.24 : Onde ultrasonore transversale

La vitesse des ondes guidées est dépendante non seulement des propriétés élastiques du matériau mais aussi des paramètres géométriques comme l'épaisseur de la plaque. Les vitesses des modes guidés sont aussi souvent dispersives, c'est-à-dire dépendantes de la fréquence. Pour une géométrie donnée, plusieurs modes différents peuvent se propager. En fait, théoriquement, il existe une infinité de modes de propagation. Toutefois, pour la largeur de bande détectée par un capteur d'émission acoustique, seulement un nombre donné de ces modes sont détectés ; ils sont soit symétriques ou antisymétriques. La figure 2.25 montre la différence entre les modes symétrique et antisymétrique.

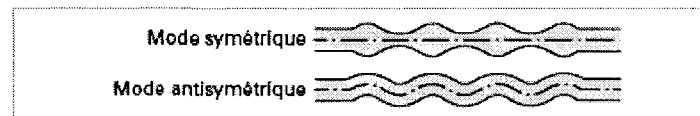


Figure 2.25 : Ondes de Lamb : mode symétrique et mode antisymétrique

Les relations de dispersion pour les modes guidés sont trouvées en substituant les solutions des ondes de déplacement dans les équations de mouvement élastique linéaire. Un graphique typique de la dispersion des 4 premiers modes de Lamb symétriques et antisymétriques est présenté sur la figure 2.26.

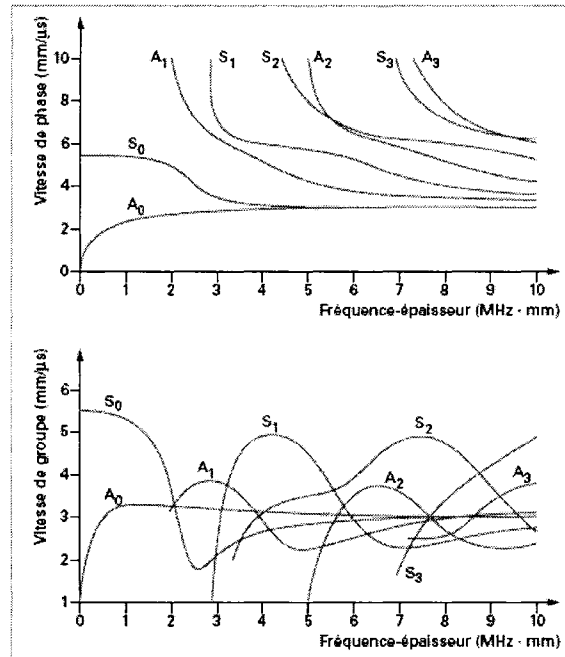


Figure 2.26 : Vitesse de phase et de groupe pour un matériau donné selon le produit fréquence-épaisseur

Dans cette figure, les vitesses sont exprimées en fonction du produit de la fréquence et de l'épaisseur de la plaque étant donné que la dispersion dépend des deux. Pour de petites valeurs du produit fréquence-épaisseur, seulement les premiers modes symétriques et antisymétriques peuvent se propager.

2.4.3 Capteur d'émission acoustique et système d'acquisition

Le capteur est l'élément clé dans un système d'acquisition par émission acoustique. Celui-ci est composé d'un cristal piézoélectrique qui convertit le déplacement de l'onde en une différence de potentiel électrique. Ce cristal est abrité dans une enceinte avec une plaque de support et un connecteur.

Le capteur est excité par les ondes mécaniques qui entrent en contact avec sa surface, celui-ci génère un signal électrique qui après amplification est transmis au système de traitement numérique des signaux. Ce système est normalement un ordinateur muni de cartes d'acquisition et de traitement, capable d'acquérir et de traiter des centaines de milliers de données très rapidement.

L'une des qualités les plus prisées des capteurs d'émission acoustique est leur sensibilité. Bien que des capteurs très fiables ayant des réponses fréquentielles stables existent sur le marché, la plupart des tests d'émission acoustique se font à l'aide de capteurs de type résonant ou bande étroite qui sont plus sensibles et moins coûteux [Pollock, 1989]. Ces capteurs ont une ou plusieurs fréquences de résonance préférentielles qui sont dictées par la grandeur et la forme du cristal. Ces fréquences préférentielles dominent les formes d'onde et les spectres de fréquence des signaux observés dans les tests d'émission acoustique. Quand un capteur de type résonant est excité par un pulse à grande largeur de bande, il résonne comme une cloche à sa fréquence naturelle de résonance. Ainsi, le signal électrique à la sortie du capteur est le résultat de cette résonance et du spectre de fréquence relié aux divers modes de propagation de l'onde dans la plaque.

2.4.4 Principes de l'instrumentation

L'instrumentation d'un test d'émission acoustique permet la détection de l'émission continue ou celle de plusieurs émissions de type transitoire. Typiquement, l'instrumentation de l'émission acoustique doit remplir les exigences suivantes :

- L'instrumentation doit fournir certaines mesures de la quantité totale des émissions détectées pour faire des corrélations avec le temps et la charge et pour faire l'évaluation de la condition de la pièce.
- Le système a normalement besoin de fournir certaines informations statistiques sur les signaux d'émission acoustique détectés afin de faire des diagnostics plus détaillés sur les mécanismes de la source ou pour l'évaluation de la signification des signaux détectés.
- Le système doit fournir le moyen de faire la discrimination entre les signaux d'intérêt et le bruit ambiant comme la friction, les impacts ou la propagation des fissures.

Après la détection et la préamplification, le signal est transmis à l'instrument principal où il est encore là amplifié et filtré. Ensuite, arrive l'étape critique de l'échantillonnage et la numérisation des signaux afin d'extraire des paramètres caractéristiques. Cette étape est accomplie avec un circuit comparateur qui génère un pulse numérique de sortie lorsque le signal d'émission acoustique dépasse un seuil de tension électrique prédéterminé. La

relation entre le signal, le seuil et les types d'émission acoustique est montrée sur la figure 2.27.

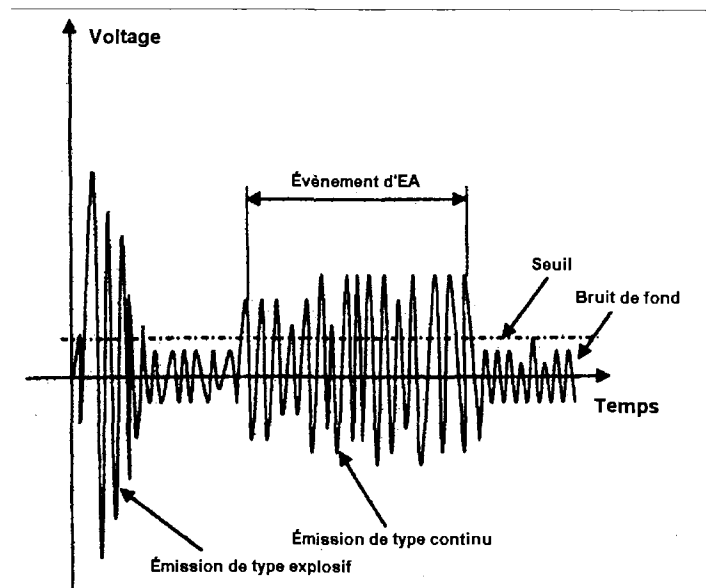


Figure 2.27 : Représentation schématique d'un signal d'émission acoustique montrant la relation entre le signal et le seuil [Mechefske et coll., 2002]

Le niveau du seuil est normalement déterminé par l'utilisateur de l'instrument ; c'est le paramètre clé qui détermine la sensibilité. Tout dépendant du design de l'instrument, la sensibilité peut aussi être contrôlée en ajustant le gain de l'amplificateur. L'une des plus traditionnelles et plus simples méthodes pour quantifier l'activité générée lors d'une émission acoustique est de faire le compte des pulses qui croisent le seuil. Ce compte d'émission acoustique est alors mis sur un graphique en fonction du temps ou de la charge, soit sous forme d'un total cumulatif ou sous forme d'un histogramme qui montre le taux de comptage.

2.4.5 Système d'émission acoustique utilisé pour le suivi du procédé de crêpage

Comme on l'a déjà précisé, les tests d'émission acoustique ont été utilisés dans l'objectif de faire le suivi en temps réel de pièces en mouvement soumises à des efforts de frottement afin de pouvoir quantifier le degré d'usure dont elles font l'objet. Dans le cas étudié dans ce mémoire, le suivi par émission acoustique sert à évaluer l'usure de la lame de crêpage qui est due au frottement de celle-ci sur le yankee et à connaître l'évolution

de la réponse de la lame, en fonction du temps de frottement durant la vie utile de la lame. L'objectif final est de pouvoir corréler l'information extraite relative à l'usure de la lame avec la qualité du papier.

Le principe de la technique consiste à attacher sur la plaque deux capteurs piézoélectriques du type large bande. La chaîne d'acquisition des signaux est composée d'un filtre amplificateur large bande et d'un système de traitement des signaux numériques (Microdisp). Le filtrage permet l'élimination des bruits basses fréquences. Le système a été programmé afin de calculer des paramètres temporels, fréquentielles et statistiques sur chaque signal acquis durant la durée de vie de la plaque de crêpage. Les capteurs utilisés sont du type R50a de la compagnie Physical Acoustics Corporation (PAC); ils sont légers, très sensibles, et peuvent être utilisés dans une large gamme de fréquence (100 à 700 kHz). La gamme de température d'utilisation varie quant à elle de -65°C à +177°C. Lors des essais, la température a été prise au niveau du bout de la lame qui frotte sur le yankee. Cette température avoisine les 190°C. Les capteurs sont donc utilisés au delà de la limite de leur fonctionnement optimal. Toutefois, les signaux obtenus sont cohérents, le seul risque est le claquage du capteur avec la lame.

Les capteurs ont été fixés sur la lame de crêpage grâce à un dispositif de serrage constitué de deux écrous assemblés directement sur la lame ainsi que d'une plaquette de retenue. Pour réaliser ce test, il a fallu percer deux trous à 21,6 cm de chacune des extrémités des lames à analyser, afin de fixer deux supports dans lesquels sont placés les capteurs piézoélectriques. Le couplage acoustique entre le capteur et la lame est assuré par un film de silicone. Celui-ci permet d'assurer une bonne transmission acoustique. Pour transférer les signaux acoustiques, les capteurs sont reliés par des câbles dont l'armature les protège des bruits extérieurs. Les signaux d'émission acoustique produits par les capteurs piézoélectriques sont amplifiés avant d'être transmis au système d'acquisition et de traitement des signaux. Un préamplificateur est utilisé avec trois possibilités de gain : 20 dB, 40 dB et 60 dB. Dans le cas étudié, des gains de 20 et de 40 dB sont utilisés. Le signal amplifié est alors transmis au système de traitement numérique des signaux (PAC). Relié à un ordinateur, le système permet de suivre en temps réel la mesure d'émission acoustique. Lorsque la lame est placée au contact du yankee, il suffit de lancer l'acquisition pour enregistrer toutes les données de l'émission acoustique. Pendant toute la procédure, l'enregistrement est suivi attentivement afin de noter toute anomalie (un changement brutal de pente, une chute de puissance, etc.). Étant donné que l'objectif de cette étude est l'évaluation de la dégradation de la lame de crêpage durant le déroulement du papier, il a été important de s'assurer que les

conditions de mesure et d'acquisition des signaux demeurent constantes durant toute la durée de vie de la lame. Par conséquent avant l'acquisition des signaux, une calibration optimale a été effectuée de façon à ne pas introduire des distorsions dans les signaux due aux saturations de l'appareillage.

En parallèle, toute information reliée au changement des rouleaux ou à l'arrêt du crêpage due à la déchirure du rouleau de papier a été prise en note. Ces commentaires ont été assemblés dans un tableau pour chaque test afin d'expliquer les courbes de tendance d'émission acoustique. À la fin du test, les données sont enregistrées dans un fichier afin de pouvoir les transférer dans d'autres logiciels pour en faire le traitement.

2.4.6 Émission acoustique et usure par friction

i. Mécanismes sources

Il existe trois grands types de mécanismes sources pour l'émission acoustique dans les métaux ; les mécanismes qui induisent la déformation plastique, les mécanismes liés aux variations brusques de microstructures et les mécanismes liés à l'endommagement [Baranov et coll., 2007]. Les signaux d'émission acoustique émis durant la friction de solides dépendent des processus mécaniques et physico-chimiques variés se produisant dans les zones de contact et sont reliés aux processus de déformation plastique du matériau, à l'apparition des microfissures et aux mécanismes spécifiques à la friction. Le tableau 2.4 montre les différentes sources possibles d'émission acoustique lors de la friction entre deux solides.

Tableau 2.4 : Sources d'émission acoustique lors de la friction entre deux solides [Baranov et coll., 2007]

Sources d'émission acoustique
Déformation plastique, endommagement
Génération, déplacement et interaction des dislocations
Libération d'énergie suite à des déformations répétées
Frottement entre deux surfaces
Formation de microfissures et de nouvelles surfaces dues à l'usure
Arrachement de matière causé par la friction
Bris des surfaces

Ce qui distingue l'émission acoustique générée lors de la friction est la présence de sources additionnelles en comparaison avec la déformation et la rupture. Ces sources sont le résultat de processus très rapide qui se produisent dans la zone de friction. Parmi eux, on retrouve les interactions élastiques des aspérités de surface, les processus chimiques incluant la corrosion qui accompagne la friction dans plusieurs cas et la formation et la rupture des jonctions adhésives. Cependant, il est très difficile, voire impossible, d'étudier un seul de ces processus à la fois.

L'émission acoustique due à la friction est normalement attribuée aux changements dans l'état contrainte-déformation des zones de contact et à l'apparition de débris d'usure. Les caractéristiques de l'émission acoustique dépendent grandement du mode d'usure. Des valeurs d'intensité plus grandes des signaux d'émission acoustique sont normalement associées avec l'usure abrasive tandis que des valeurs plus basses sont associées avec l'usure adhésive et l'usure par fatigue. Les matériaux endommagés par l'usure adhésive et l'usure par fatigue produisent des signaux continus avec de faibles amplitudes tandis que les matériaux endommagés par l'usure adhésive avec attaque produisent des signaux de nature explosive [Baranov et coll., 2007].

En résumant les données disponibles, il est possible de classer toutes les sources d'émission acoustique en trois groupes :

- Les processus d'impact des microreliefs des surfaces de friction
- Les processus de l'endommagement de la surface incluant la déformation plastique et l'endommagement corrosif
- Les processus de formation et de rupture des joints de friction

Puisque l'énergie libérée dans ces processus est différente, ils sont généralement accompagnés par des signaux d'émission acoustique de types variés. Les signaux d'émission acoustique dominant dans l'endommagement des couches surfaciques sont des signaux transitoires et distincts tandis que pour les déformations plastiques, ce sont des signaux continus qui prédominent. En ce qui concerne la rupture des joints d'adhésion sur les surfaces en friction, ce sont des signaux autant continus que transitoires qui peuvent être générés [Baranov et coll., 2007].

ii. Types de signaux d'émission acoustique

Les signaux d'émission acoustique dans les solides résultent d'une variété d'évènements distincts aléatoires. Comme tous les signaux, les signaux d'émission acoustique sont caractérisés par des paramètres temporels, fréquentiels et statistiques comme il sera question dans la prochaine section. L'analyse de ces paramètres permet d'extraire de l'information sur un phénomène physique source qui cause l'émission acoustique. Le tableau 2.5 montre le contenu informatif que peuvent contenir certains paramètres de signaux d'émission acoustique dans le cas de l'endommagement des métaux.

Tableau 2.5 : Contenu informatif des paramètres d'émission acoustique dans les métaux [Baranov et coll., 2007]

Paramètres de l'émission acoustique	Contenu informatif
Spectre de fréquence	Nature de la source d'E.A
Amplitude	Énergie de la source d'E.A.
Distribution de l'amplitude	mode de rupture
Taux de comptage	Taux de croissance des défauts
Distribution temporelle des impulsions	Type de défauts en croissance

A titre d'exemple, la figure 2.28 montre la complexité du contenu dans un signal typique d'émission acoustique enregistré lors de la friction entre deux métaux.

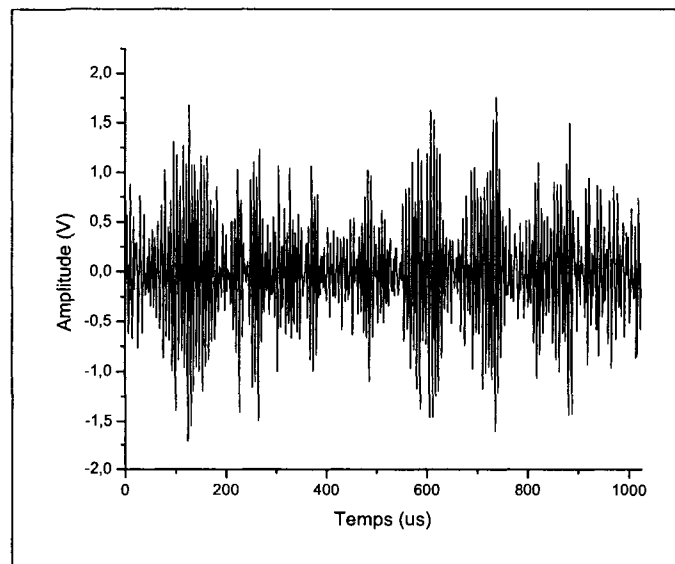


Figure 2.28 : Signal typique d'émission acoustique due à l'usure par friction de métaux

Il est possible de voir sur cette dernière figure que les signaux d'émission acoustique causés par la friction sont de nature continue. Cependant il est possible de voir, dans les signaux, que des événements distincts se produisent aléatoirement dans le temps et qui reflètent la complexité des mécanismes sources reliés à l'usure. Ces événements sont le résultat de processus d'usure énergétiques causés par le frottement. Il est même possible de pouvoir isoler chacun de ces signaux distincts par l'utilisation de techniques de traitement des signaux avancés tel que les techniques de filtrage par ondelettes. Il en sera d'ailleurs question plus loin dans ce mémoire.

2.5 Traitement numérique des signaux d'émission acoustique

2.5.1 Analyse paramétrique

Il existe plusieurs méthodes pour traiter les signaux d'émission acoustique afin de ressortir des paramètres qui aident à les caractériser. Dans cette section, il est question des paramètres temporels, fréquentiels et statistiques qui peuvent être calculés ou mesurés sur les signaux d'émission acoustique.

i. Domaine temporel

Le terme domaine temporel fait référence à l'ensemble des paramètres non statistiques évalués à partir de la représentation temporelle du signal d'EA. Ces paramètres ont été développés afin de discerner des caractéristiques propres à la forme du signal.

Les quatre paramètres de mesure de signaux dans le domaine temporel les plus utilisés sont le compte, l'amplitude, la durée et le temps de montée. Ils sont illustrés sur la figure 2.29 [Pollock, 1989].

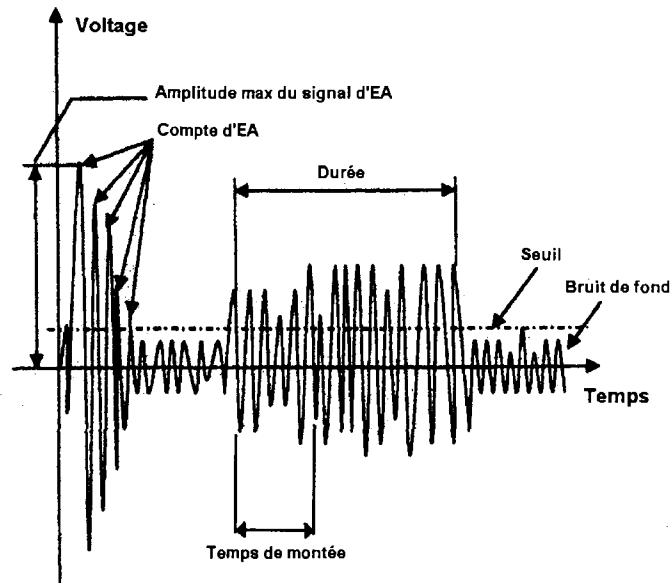


Figure 2.29 : Schéma de différents paramètres d'émission acoustique [Mechefske et coll., 2002]

L'amplitude, A , est l'amplitude de la tension la plus haute atteinte par la forme d'onde d'émission acoustique. C'est un paramètre très important car il est proportionnel à l'énergie d'une source d'émission acoustique. L'amplitude des émissions acoustiques est directement reliée à la magnitude de l'évènement qui se passe au niveau de la source et elle varie sur une gamme très large qui va du microvolt au volt. De tous les paramètres conventionnels, l'amplitude est celui qui est le plus pratique pour développer des informations statistiques sous la forme d'une fonction de distribution. Les amplitudes des émissions acoustiques sont normalement exprimées en décibel sur une échelle logarithmique, dans laquelle $1 \mu\text{V}$ au transducteur est définie comme 0 dBae, $10 \mu\text{V}$ donne 20 dBae, $100 \mu\text{V}$ donne 40 dBae et ainsi de suite.

Le compte, N , sont les pulses qui dépassent le seuil. Le compte dépend de la magnitude de la source mais aussi des propriétés acoustiques du matériau et du capteur. Le compte peut aussi dépendre de la durée d'enregistrement si l'amplitude du signal est toujours plus grande que le seuil prédéfini.

La durée, D , est le temps qui sépare le premier croisement du seuil du dernier croisement pour un signal donné. Directement mesuré en microsecondes, ce paramètre dépend de l'intensité de la source de la même manière que le compte. Ce paramètre est intéressant dans la mesure où il permet de reconnaître certains processus de source qui ont une

longue durée comme les frottements des surfaces en contact. Il peut aussi être utile pour faire le filtrage du bruit et pour réaliser une discrimination entre divers signaux.

Le temps de montée, R , est le temps qui sépare le premier croisement du seuil de la crête du signal. Ce paramètre peut être utile afin de qualifier différents types de signaux ainsi que pour le rejet du bruit ambiant.

Il existe aussi une foule d'autres paramètres temporels qui sont mesurés par les appareils conventionnels de suivi par émission acoustique. Le tableau 2.6 en présente quelques-uns avec les expressions qui permettent de les calculer.

Tableau 2.6 : Liste de certains paramètres temporels [Leblanc, 1999]

Désignation	Description	Expression
CRCR	Amplitude crête à crête	$\max(x_i) - \min(x_i)$
MAX	Amplitude maximale du signal	$\max(x_i)$
ENER	Énergie du signal	$\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot T_e$
RMS	Amplitude RMS (racine de la moyenne quadratique)	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{(n-1)}}$
NCRN	Nombre de pics sur le nombre de points	$\frac{ncr}{n}$

T_e : Temps d'échantillonnage

x_i : Valeur des échantillons

n : Nombre de points

ncr : Nombre de crêtes

ii. Domaine fréquentiel

Les paramètres fréquentiels ont pour but d'extraire des informations précises qui sont mises en évidence lorsque le signal d'origine est représenté dans le domaine fréquentiel par son module. Celle-ci se définit par :

$$Module = \sqrt{(\text{Re } f_k)^2 + (\text{Im } f_k)^2} \quad (2.11)$$

où Re et Im représentent les parties réelles et imaginaires du vecteur f_k . On obtient ce vecteur à la suite de l'évaluation d'une transformée de Fourier discrète dont l'expression est :

$$f_k = \sum_{i=1}^n S_i e^{-j2\pi f_i i} \text{ où } j = \sqrt{-1} \quad (2.12)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N/2$$

Le tableau 2.7 présente certains paramètres qui peuvent être mesurés à partir du spectre de fréquence.

Tableau 2.7 : Liste de certains paramètres fréquentiels [Leblanc, 1999]

Désignation	Description
AMAX	Amplitude maximum du spectre de fréquence
FMAX	Fréquence correspondante à AMAX
ART	Aire totale sous le spectre de fréquence
FMOY	Fréquence moyenne du spectre de fréquence

Il est aussi possible de séparer le spectre de fréquence en plusieurs tranches de fréquence et de mesurer ces derniers paramètres pour chacune de ses tranches.

iii. Paramètres statistiques

Les paramètres statistiques ont été développés dans le but de mettre en évidence des informations contenues dans l'ensemble de la forme du signal. Ils trouvent leur application à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. Les paramètres statistiques les plus utilisés sont présentés dans le tableau 2.8 avec les expressions qui permettent de les calculer.

Tableau 2.8 : Liste de certains paramètres statistiques [Leblanc, 1999]

Désignation	Description	Expression
MOY	Amplitude moyenne du signal	$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$
STD	Déviati�n standard	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$
SKW	Facteur de Skewness	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$
KTS	Facteur de Kurtosis	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$

La moyenne arithmétique est la moyenne ordinaire, c'est-à-dire la somme des valeurs numériques du signal divisée par le nombre de ces valeurs numériques.

La déviation standard, ou écart-type, permet d'évaluer la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne. Plus la valeur de la déviation standard est grande, plus les données se retrouvent en général loin de la moyenne.

Le facteur de Skewness mesure le degré d'asymétrie de la distribution. Il est défini par le moment d'ordre trois centré sur le cube de l'écart-type. Si le facteur est égal à 0, la distribution est symétrique. Si il est plus petit que 0, la distribution est asymétrique vers la gauche et si il est plus grand que 0, la distribution est asymétrique à droite.

Le facteur de Kurtosis mesure le degré d'écrasement de la distribution. Il se définit comme le rapport entre le moment d'ordre quatre centré et le carré de la variance. Lorsqu'il est positif, cela indique que la distribution est "pointue". Lorsqu'il est négatif, cela indique que la distribution est relativement "écrasée".

iv. Paramètres mesurés et calculés par AEwin^{MD}

À l'aide du logiciel AEwin^{MD}, on calcule les paramètres sur les signaux d'émission acoustique enregistrés en temps réel. Ces paramètres sont calculés dans le domaine temporel, dans le domaine fréquentiel et enfin dans le domaine statistique. Après calcul, ces paramètres sont regroupés dans une matrice qui est utilisée pour réaliser des corrélations ou pour faire l'analyse multidimensionnelle basée sur les composantes

principales. Le tableau 2.9 donne la description sommaire de la liste des paramètres, calculés sur les signaux, qui seront utilisés pour évaluer les processus d'usure des lames.

Tableau 2.9 : Description des différents paramètres d'émission acoustique mesurés et calculés dans le logiciel AEwin^{MD}

Paramètres	Description
Temps de montée	Temps entre le début du signal d'E.A. et l'amplitude maximale
Compte	Nombre de fois que le signal dépasse le seuil
Compte au pic	Nombre de fois que le signal dépasse le seuil jusqu'à l'amplitude maximale
Énergie	Énergie du signal calculée dans le domaine temporel
Durée	Temps entre la première et la dernière fois que le signal croise un seuil prédéfini
Amplitude	Valeur maximale du signal en dB par rapport à une référence de 1 microvolt
Fréquence moyenne	Déterminé par la formule suivante : (Compte/Durée)
RMS	Valeur moyenne quadratique du signal
Fréquence de réverbération	Fréquence moyenne qui suit le maximum du signal. Déterminé par la formule : (Compte – Compte au pic) / (Durée – Temps de montée)
Force du signal	Force de la valeur absolue du signal d'E.A. Calculé comme l'intégrale de la tension redressée du signal sur toute sa durée
Énergie absolue	Mesure de l'énergie vraie du signal d'E.A.
Fréquence centroïde	Déterminé par : SOMME(Magnitude*Fréquence) / SOMME(Magnitude) à partir de la FFT du signal
Fréquence du pic	Déterminé par le point dans le spectre de puissance auquel correspond l'amplitude la plus grande

Étant donnée la nature aléatoire des sources des signaux dans le temps et la quantité énorme d'information recueillis lors du suivi en temps réel du crêpage. Il est impératif d'utiliser des techniques d'analyse basées sur les méthodes statistiques et les méthodes de reconnaissance des formes afin de réaliser une fusion des données et d'extraire les paramètres les plus discriminants qui permettent l'identification des mécanismes sources d'émission acoustique et réaliser le suivi de l'état de dégradation des lames en cours d'essai.

2.5.2 Analyse en composantes principales

Il est possible de voir, dans les sections précédentes, qu'une quantité importante de paramètres peuvent être calculés ou mesurés sur les signaux d'émission acoustique autant dans le domaine temporel que fréquentiel. Étant donné la quantité impressionnante d'information contenue dans ces signaux, il est très difficile de bien cerner le comportement des lames en analysant que certains paramètres. C'est pourquoi il faut chercher à réduire la quantité de données tout en gardant le plus possible les variables les plus importantes. C'est le but de l'analyse en composante principales (ACP). Dans ce type d'analyse, on cherche une fusion de plusieurs variables sous forme d'une combinaison linéaire (normalisée) de variance maximum [Droesbeke et coll., 1992]. Il est souvent d'usage de normer au préalable les données, afin que les variables soient de variance unitaire.

En termes géométriques, on recherche une droite D' (axe factoriel) qui rend minimum la somme des carrés des distances entre points et projections respectives sur la droite. La droite D' est alors, selon le signe du coefficient de corrélation, parallèle à la première ou à la seconde bissectrice [Droesbeke et coll., 1992].

L'ACP permet donc de procéder à une transformation linéaire qui fait passer des données d'un espace à haute dimension vers un espace à dimension moindre. On pose :

$$\begin{aligned} b_1 &= t_{11}a_1 + t_{12}a_2 + \dots + t_{1n}a_N \\ b_2 &= t_{21}a_1 + t_{22}a_2 + \dots + t_{2n}a_N \\ &\dots \\ b_k &= t_{k1}a_1 + t_{k2}a_2 + \dots + t_{kn}a_N \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\text{Ou } y = Tx \text{ où } T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1N} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{K1} & t_{K2} & \dots & t_{KN} \end{pmatrix}$$

i. Base à dimension moindre

(1) Représentation d'espace à haute dimensionnalité

$$x = a_1 v_1 + a_2 v_2 + \dots + a_N v_N \quad (2.14)$$

v_1, v_2, \dots, v_N est une base de l'espace à N dimension

(2) Représentation d'espace à moindre dimensionnalité

$$\hat{x} = b_1 u_1 + b_2 u_2 + \dots + b_K u_K \quad (2.15)$$

u_1, u_2, \dots, u_K est une base de l'espace à K dimension

Note : Si les deux bases ont la même dimension ($N = K$), alors $x = \hat{x}$

Le meilleur espace de moindre dimension peut être déterminé par le meilleur vecteur propre de la matrice de covariance de x . Autrement dit, le vecteur qui correspond à la valeur propre la plus grande, aussi appelé composantes principales.

ii. Méthodologie

On suppose que x_1, x_2, \dots, x_M sont des vecteurs de $N \times 1$

1^{ère} étape : $\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i$

2^e étape : On enlève la moyenne : $\Phi_i = x_i - \bar{x}$

3^e étape : On forme la matrice $A = [\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \dots \quad \Phi_M]$ (matrice $N \times M$), et on calcule :

$$C = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \Phi_n \Phi_n^T = A A^T$$

Qui est la matrice de covariance échantillonnée, $N \times N$, qui caractérise la dispersion des données.

4^e étape : On calcule les valeurs propres de $C : \lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$

5^e étape : On calcule les vecteurs propres de $C : u_1, u_2, \dots, u_N$

Puisque C est symétrique, u_1, u_2, \dots, u_N forme une base. N'importe quel vecteur x ou en fait $(x - \bar{x})$ peut être réécrit comme une combinaison linéaire des vecteurs propres :

$$x - \bar{x} = b_1 u_1 + b_2 u_2 + \dots + b_N u_N = \sum_{i=1}^N b_i u_i \quad (2.16)$$

6^e étape : (étape de la réduction de dimension) On garde seulement les termes qui correspondent aux K plus grandes valeurs des valeurs propres :

$$\hat{x} - \bar{x} = \sum_{i=1}^K b_i u_i \text{ où } K \ll N \quad (2.17)$$

La représentation de $\hat{x} - \bar{x}$ dans la base u_1, u_2, \dots, u_K est donc :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_K \end{bmatrix}$$

La transformation linéaire qu'implique l'analyse par composantes principales est donc :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_K^T \\ u_K^T \\ \dots \\ u_K^T \end{bmatrix} (x - \bar{x}) = U^T (x - \bar{x}) \quad (2.18)$$

iii. Interprétation géométrique

- L'ACP projette les données dans les directions où les données varient le plus.
- Ces directions sont déterminées par les vecteurs propres de la matrice de covariance qui correspond à la valeur propre la plus grande.

- L'amplitude des vecteurs propres correspond à la variance des données le long des directions des vecteurs propres.

iv. Propriétés et hypothèses

- Les nouvelles variables b_i sont non corrélées entre elles.
- Puisque les nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des variables originales, il est souvent difficile d'interpréter leur signification.

v. Choix des composantes principales

Pour trouver K , on utilise normalement le critère suivant :

$$\frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} > \text{seuil} \quad (\text{exemple : } 0,9 \text{ ou } 0,95) \quad (2.19)$$

vi. Erreur due à la diminution des dimensions

L'erreur est égale à :

$$e = 1/2 \sum_{i=K+1}^N \lambda_i \quad (2.20)$$

vii. Standardisation

- Les composantes principales dépendent des unités utilisées pour mesurer les variables originales ainsi que des plages sur lesquelles ces valeurs sont réparties.
- On devrait toujours standardiser les données avant de faire de l'analyse en composantes principales
- Une méthode courante de standardisation est de transformer toutes les données pour qu'elles aient une moyenne nulle et une déviation standard égale à l'unité :

$$\frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (\mu \text{ et } \sigma \text{ sont la moyenne et la déviation standard des } x_i) \quad (2.21)$$

L'ACP permet donc de procéder à une transformation linéaire qui fait passer des données d'un espace à dimension élevée vers un espace à dimension moindre. Dans le cas des signaux d'émission acoustique, chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables originales, qui correspondent aux paramètres calculés sur les signaux. L'information portée par l'une des composantes principales est donnée par la variance des N réalisations pour cette composante.

L'analyse en composantes principales résulte de la recherche des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de variance-covariance. Ceux-ci sont ensuite ordonnés selon les valeurs propres décroissantes. Le pourcentage de variance, donc d'information expliquée par chaque composante, est égal à la valeur propre correspondante dirigée par la matrice de variance-covariance. La réduction des données s'effectuera alors en ne conservant que les premières composantes qui permettent d'expliquer un pourcentage de variance élevé, soit des pourcentages variant entre 80% à 100% par exemple.

2.6 Applications de l'émission acoustique à l'usure

La littérature montre qu'une quantité impressionnante d'études portent sur le suivi de l'usure grâce à la technique de l'émission acoustique. La raison pour laquelle la friction et l'usure sont aussi étudiées réside dans le fait que des sommes d'argent importantes sont directement reliées au bon fonctionnement des composantes qui subissent l'usure. Plusieurs chercheurs ont essayé de suivre ces problèmes d'usure afin de prévenir le bris ou le mauvais fonctionnement de composantes mécaniques. Les méthodes utilisées pour la prédiction de la durée de vie de composantes mécaniques et les techniques pour diagnostiquer la détérioration de pièces due à l'usure sont très importantes dans le développement et l'opération de systèmes mécaniques. De plus, les techniques de détection pour suivre l'usure, la détérioration et la défaillance de pièces en temps réel sont très prisées car les méthodes conventionnelles qui reposent sur une analyse de l'usure après le procédé ont une valeur limitée en ce qui a trait à l'information qu'elles peuvent fournir sur la dynamique de l'usure.

Les émissions acoustiques générées par le matériau qui subit des contraintes de contact complexes induites lors du frottement offrent une méthode novatrice afin d'étudier les mécanismes d'usure complexes qui surviennent entre les surfaces en frottement. Elles offrent aussi la possibilité de suivre continuellement l'usure et permettent de faire l'étude

fondamentale des processus d'usure [Sun et coll., 2003]. Les paragraphes qui suivent montrent certains résultats de recherches sur l'usure et l'émission acoustique qui ont contribué à identifier l'état d'usure de composantes mécaniques en temps réel.

L'un des paramètres d'émission acoustique les plus investigués pour l'étude de l'usure par friction est sans contredit le paramètre RMS de l'amplitude en volt des signaux. Ce paramètre renseigne sur l'énergie libérée lors de la friction entre les composantes en frottement. Ravindra et coll. [Ravindra et coll, 1997] se sont penchés sur le suivi de l'état d'outil de coupe de métaux à l'aide de l'émission acoustique. Leurs recherches ont montré que ce paramètre dépend de la sévérité de l'usure, qui dépend à son tour de la pression de coupe et ainsi de l'aire de contact entre l'outil de coupe et la pièce. Dans les premiers stades d'usure, une augmentation du niveau RMS est remarquée mais ce niveau reste ensuite stable dans le régime permanent d'usure. La figure 2.30 montre ce phénomène.

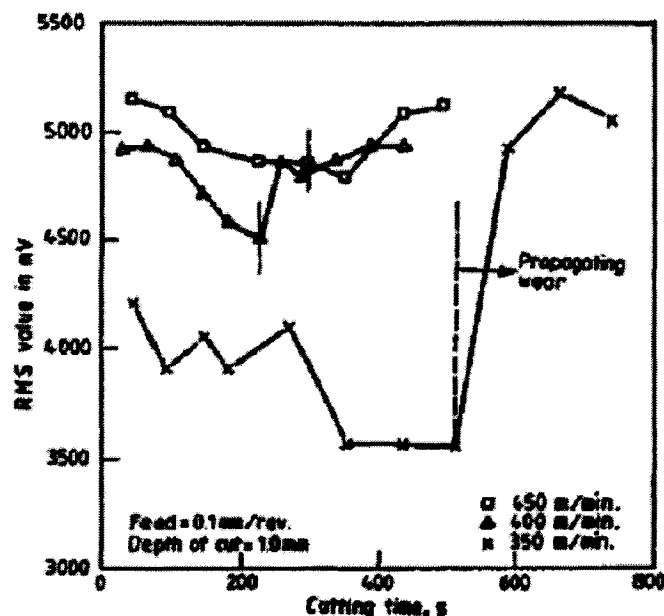


Figure 2.30 : Relation entre le niveau RMS des émissions acoustiques et le temps de coupe [Ravindra et coll., 1997]

Dans cette étude, Ravindra et coll. montrent aussi un fait intéressant entre la puissance des signaux d'émission acoustique (exprimée en valeur RMS dans ce cas) et l'usure de l'outil de coupe. Il existe une tendance d'augmentation claire du paramètre RMS avec l'usure frontale (exprimée en micromètres) de différents outils de coupe (figure 2.31). De plus, la densité spectrale de puissance (PSD) des signaux révèle qu'il y a une augmentation dans le nombre des composantes fréquentielles plus la pièce est usée.

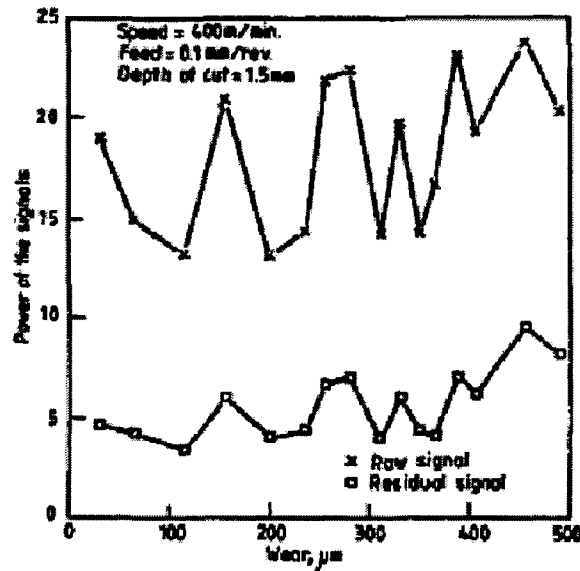


Figure 2.31 : Relation entre la puissance du signal et l'usure frontale d'un outil de coupe [Ravindra et coll., 1997]

Guo et coll. [Guo et coll., 2005] se sont quant à eux penchés sur le suivi en temps réel par émission acoustique de l'état de surface de pièce pour l'usinage. Ils ont montré qu'il y avait une tendance décroissante du paramètre RMS avec l'augmentation du temps d'utilisation de l'outil de coupe. De plus, il a été démontré que le fini de surface fin correspond avec des valeurs du paramètre RMS élevées et qu'une diminution du RMS correspond avec des surfaces rugueuses. La figure 2.32 montre ce phénomène.

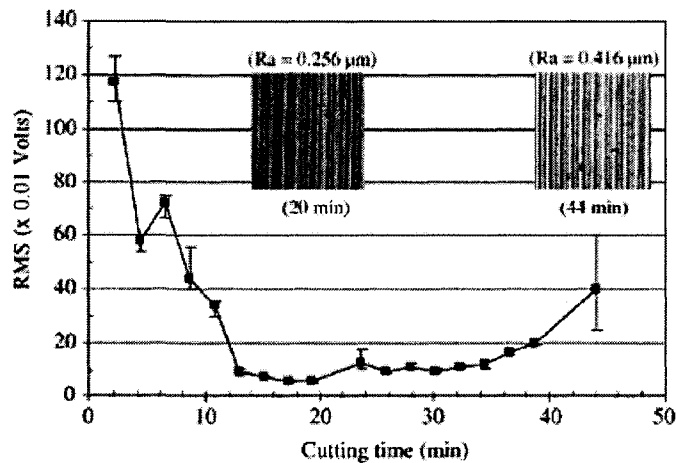


Figure 2.32 : Relation entre le fini de surface, le paramètre RMS et le temps d'utilisation d'un outil de coupe [Guo et coll., 2005]

De leur côté, Hisakado et coll. ont évalué les relations qui existent entre la friction, l'usure et les caractéristiques d'émission acoustique pour un couple de friction composé d'une tige de fer et d'un disque d'acier. Cette étude a montré que le taux de comptage des événements d'émission acoustique avait tendance à augmenter avec l'augmentation du taux d'usure de la tige et avec l'augmentation du coefficient de friction moyen entre la tige et le disque [Hisakado et coll., 1997]. Ils ont aussi montré qu'une augmentation du taux de comptage des événements d'émission acoustique survenait lorsqu'il y avait augmentation de la profondeur moyenne des sillons d'usure dus au frottement. La figure 2.33 montre quelques résultats qui ont été obtenus dans cette recherche.

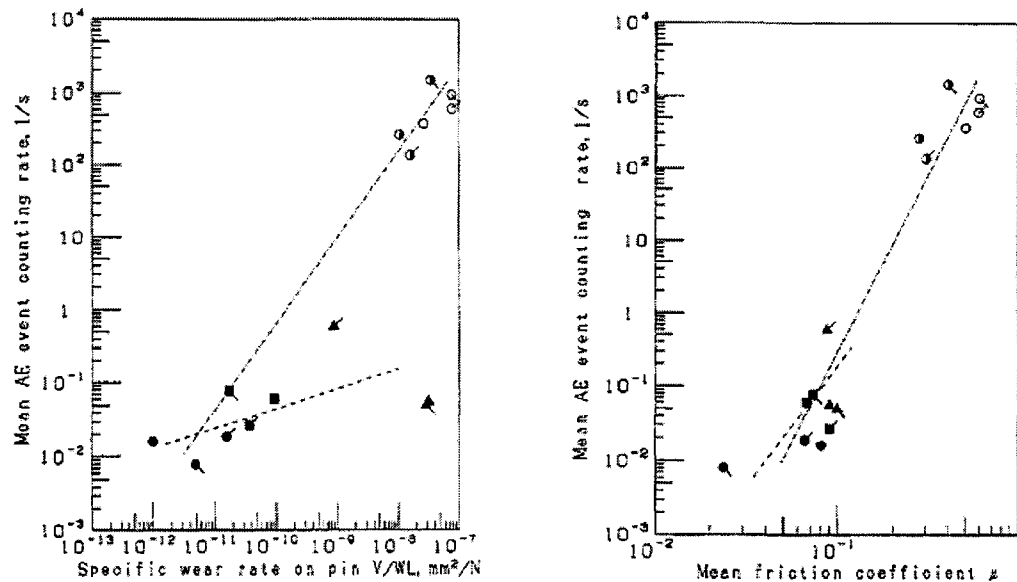


Figure 2.33 : Relation entre le taux de comptage des événements d'émission acoustique, le taux d'usure et le coefficient de friction [Hisakado et coll., 1997]

Certaines autres recherches portant sur le suivi par émission acoustique de couples de friction sont présentes dans la littérature. Ces études traitent de l'influence des paramètres de friction tels que la charge et la vitesse de frottement sur les paramètres d'émission acoustique. Bereznyakov et coll. ont justement développé un modèle pour l'émission acoustique résultante de la variation dans l'énergie de surface due à l'usure d'un couple de friction. De plus, les dépendances prédites théoriquement sur l'amplitude des émissions acoustiques sur le comportement tribologique ont été supportées expérimentalement. Il a été montré que l'amplitude de l'émission acoustique est proportionnelle à la vitesse de frottement et au taux d'usure. Il a aussi été démontré que l'émission acoustique est influencée par les paramètres géométriques d'un système tribologique [Bereznyakov et coll., 1998].

De leur côté, Rippengill et coll. [Rippengill et coll., 2003] utilisent l'analyse en composantes principales à partir des signaux d'émission acoustique enregistrés sur une poutre-caisson d'un pont afin de classer les différentes sources d'émission acoustique. Quatre paramètres normalisés sont utilisés dans l'ACP, soient le temps de montée, l'amplitude maximum du signal, la durée du signal et le compte à partir du pic du signal jusqu'à la fin de sa durée. Cette analyse a permis de classer les différents signaux en trois groupes distincts correspondant à différents types de signaux d'émission acoustique. Le premier groupe de signaux correspond à des événements provenant de la fissuration, le deuxième à des processus de friction et le troisième à des événements reliés à la fissuration qui se produisent loin des capteurs d'EA. La figure 2.34 montre ces trois groupes grâce à une projection de la deuxième composante principale en fonction de la première.

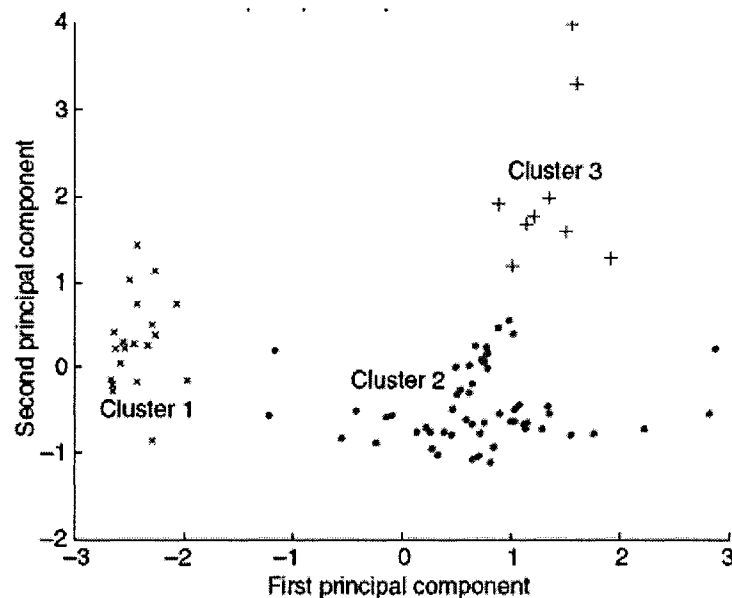


Figure 2.34 : Classification de signaux d'émission acoustique à l'aide de l'ACP
(Projection des deux premières composantes principales) [Rippengill et coll., 2003]

Ces différentes études permettent de voir qu'il est possible, grâce à la technique d'émission acoustique, d'évaluer plusieurs aspects de l'usure de pièces et ce en temps réel. Ces différentes recherches servent de base à l'étude du procédé de crêpage à l'aide de la technique d'émission acoustique.

3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Cette section présente l'approche expérimentale suivie durant tout le projet. Tout d'abord on présente les procédures d'essais sur le papier pour mesurer ses caractéristiques. Ensuite, on présente les étapes de l'analyse métallurgique réalisée sur les lames suivie d'une simulation par éléments finis du comportement mécanique des lames et enfin, on présente les procédures qui ont permis de réaliser le suivi par émission acoustique.

Les différents essais expérimentaux dont il est question dans ce chapitre se réfèrent aux tests qui ont été menés avec la machine à papier #5 de l'usine de Lennoxville entre décembre 2005 et mai 2007. En tout, ce sont sept séances d'essais à l'usine qui ont permis de collecter les données en temps réel afin d'analyser le procédé de crêpage. Les différents essais conduits lors de ces séances ont servi à enregistrer les signaux d'émission acoustique pendant l'utilisation des lames et à récupérer des échantillons de papier afin de voir l'évolution de la qualité de celui-ci. Les lames de crêpage utilisées ont aussi été récupérées pour des fins d'analyse métallurgique. Le tableau 3.1 fait la synthèse des essais effectués à l'usine de Lennoxville.

Tableau 3.1 : Synthèse des tests effectués à l'usine

Date du test	# de la lame	Grade de papier	Durée de vie (min)	# des échantillons papier	Tests effectués	Largeur de lame (cm)	Amplification des signaux (dB)
31-mai-06	L5CR003	Grade 1	89,5	3934, 3935, 3936, 3937	Dureté HRC, Cambrure	10,4	40
31-mai-06	L5CC001	Grade 1	1,5	ND		10,9	40
02-juin-06	L5CR004	Grade 1	49,5	4046, 4047	Dureté HRC, Cambrure	10,7	40
02-juin-06	L5CC002	Grade 1	39,5	ND		9,1	40
13-juin-06	L5CR005	Grade 1	18,66	4627,4628		10,1	40
13-juin-06	L5CR006	Grade 1	78,15	4630, 4631		10,1	40
13-juin-06	L5CR007	Grade 1	5,23	ND	Dureté HRC, Cambrure	10,7	40
13-juin-06	L5CR008	Grade 1	21	4639	Dureté HRC, Cambrure	10	40
13-juin-06	L5CR009	Grade 1	83,5	4640, 4641, 4642, 4643	Cambrure	10	40
20-févr-07	L5CR017	Grade 2	25,08	6751	Cambrure	9,1	40
20-févr-07	L5CR018	Grade 2	58,14	éch 10h13, éch 10h31, 6750	Cambrure	9,1	40

20-févr-07	L5CR019	Grade 2	232,14	6756 à 6764	Cambrure	12,2	40
21-févr-07	L5CR020	Grade 2	127,17	6798 à 6802	Cambrure	12,3	20
21-févr-07	L5CR022	Grade 2	171,82	6807 à 6813	Cambrure	9,1	20
08-mai-07	L5CR023	Grade 2	120,63	940 à 944	Cambrure	10,7	20
08-mai-07	L5CR024	Grade 2	100,41	949 à 952	Cambrure	10,8	20

3.1 Tests sur le papier

Les tests réalisés sur le papier à la sortie de l'embobineuse permettent de connaître la qualité du papier produit mais surtout de pouvoir faire des corrélations avec l'émission acoustique et les conditions métallurgiques de la lame. Lorsque le rouleau est prêt au conditionnement, des employés découpent un échantillon dans la largeur et l'analysent dans le laboratoire de l'usine. Tel que cité plus tôt dans ce mémoire, une dizaine de paramètres ont été définis pour essayer de caractériser au mieux la qualité du papier. Ces mesures sont effectuées dès que les rouleaux sortent de l'embobineuse afin de savoir rapidement si les paramètres se retrouvent bien dans la gamme de qualité prédéfinie par l'entreprise pour un certain grade de papier. En effet, si les données obtenues ne sont pas comprises entre des valeurs limites, le rouleau est alors rejeté de son grade de qualité pour être vendu dans un grade inférieur. La réalisation de ces tests sur tous les rouleaux crêpés par une même lame permet de savoir si la qualité est constante, ou si au contraire, elle varie suivant l'usure de la lame.

Pour certaines lames, les échantillons de papier ont été pris à toutes les 5 minutes (L5CR019 et L5CR023). Pour ce faire, des marques ont été apposées au crayon sur les rouleaux pendant le procédé. Lors du déroulement des rouleaux, il a été possible de prendre des échantillons à ces endroits et ainsi de suivre l'évolution de la qualité du papier à l'intérieur d'un même rouleau. Des échantillons ont aussi été pris dans la largeur des rouleaux, le long des lames, afin de voir l'évolution de la qualité du papier selon cette dimension.

La série de mesures présentée a donc pour objectif d'établir des corrélations entre les différents paramètres papier, d'évaluer l'évolution des différents paramètres en fonction du temps pour une même lame ou pour un même rouleau, de suivre l'évolution de la qualité du papier selon la position de l'échantillon sur la largeur de la lame et enfin d'établir des corrélations avec l'émission acoustique et l'état d'usure de lame.

3.2 Tests sur les lames

Comme il a été mentionné plus haut, toutes les lames utilisées lors du suivi par émission acoustique ont été récupérées et identifiées. Le but de cet exercice est de pouvoir réaliser une étude métallurgique afin d'évaluer les propriétés mécaniques et les variations microstructurales induites par les mécanismes d'usure que subissent les lames lors du frottement contre le yankee. C'est pour cette raison que des lames avec des temps d'usure relativement différents ont été choisies. Il est alors possible de quantifier l'usure subie par la lame et d'identifier son type et ce, pour des temps d'exposition à l'usure différents. Pour ce faire, quelques tests métallurgiques ont été utilisés.

Tout d'abord, un test de dureté Rockwell C a été appliqué sur les lames L5CR007 (5 min), L5CR008 (21 min), L5CR004 (50 min) et L5CR003 (90 min). Le test de dureté a été fait à tous les 25 cm aussi bien au centre de la largeur des lames que près de la zone usée. Ce test permet de voir l'évolution de la dureté des lames en fonction de la position sur la longueur et en fonction du temps d'exposition de la lame à l'usure.

Ensuite, des échantillons des lames L5CR007 (5 min), L5CR008 (21 min), L5CR004 (50 min) et L5CR003 (90 min) ont été découpés et placés dans de l'époxy afin d'être observé au microscope et de faire des tests de microdureté Vickers sur la pointe usée des lames. Ce test a été choisi car il permet une grande précision de l'emplacement de la dureté étant donné les petites dimensions de l'indenteur. Il permet de voir la dureté des lames dans la zone d'usure pour identifier les zones qui présentent la plus importante chute de dureté et de voir l'évolution de la microdureté en fonction du temps d'exposition à l'usure des lames.

Les lames ont aussi toutes subies un test permettant de voir l'évolution de la largeur de celles-ci en fonction de la position sur la longueur. Ces tests ont été menés à tous les 10 cm le long des lames par l'entremise d'un pied à coulisse. Un problème de cambrure des lames est à l'origine de la prise de ces mesures. Cette mesure permet de quantifier la variation dans la rectitude et le parallélisme des lames en plus d'aider à comprendre dans quelle mesure cette largeur affecte la qualité du papier produit.

Des échantillons ont aussi été découpés dans les lames L5CR007 (5 min), L5CR008 (21 min), L5CR004 (50 min), L5CR003 (90 min), L5CR022 (172 min) et L5CR019 (232 min) afin d'être analysés au microscope électronique à balayage. Les photos prises rendent

possible la mesure précise de la largeur du biseau d'usure des lames. Ce test est utile pour voir l'évolution de la largeur du biseau d'usure en fonction du temps en plus de permettre de voir la différence de largeur de ce biseau en fonction de la position sur la longueur de la lame.

Les échantillons testés pour la microdureté ont aussi servi pour un autre test qui consiste à mesurer la perte de matière subie par les lames due au frottement entre celles-ci et le yankee. Les photos prises avec le microscope optique permettent de voir la quantité de matière perdue sur les lames en fonction du temps d'exposition à l'usure. Il est ainsi possible de voir l'évolution du taux de perte de matière des lames.

Enfin, une analyse par éléments finis du comportement de lame face au frottement en fonction du temps a été réalisée. Le logiciel d'éléments finis ADINA a été utilisé à cette fin. Cette analyse sert à voir l'effet de la perte de matière de la lame sur les contraintes et les déplacements engendrés à l'extrémité usée de celle-ci. Pour ce faire, les dimensions des biseaux d'usure des lames L5CR007 (5 min), L5CR008 (21 min), L5CR004 (50 min) et L5CR003 (90 min) ont été prises afin de fabriquer le modèle.

3.3 Procédures pour l'évaluation par émission acoustique

Les tests d'émission acoustique sur les lames ont été conduits durant l'opération normale du procédé de crêpage. Deux capteurs piézoélectriques avec des fréquences de résonance de 500 kHz (Physical Acoustics Corporation, type R50α) ont été fixés à chacune des extrémités de la lame de crêpage (20,3 cm de chacune des extrémités) près de la zone de friction (figures 3.1 et 3.2). Un couplant de silicone fabriqué par la compagnie Dow Corning a été utilisé afin d'éviter les pertes d'information dans la transmission des ondes de la lame aux capteurs. Chacun des capteurs a été branché à un préamplificateur (Physical Acoustic Corporation, modèle 2/4/6) avec une amplification de 20 ou 40 dB. Les signaux captés ont été numérisés et enregistrés en format ASCII par le système d'acquisition des données microDisp^{MD} (Physical Acoustics Corporation). La période d'échantillonnage était de 500 ns et le seuil d'acquisition a été fixé à 45 dB, ce qui correspond à 0,01778 Volt. Chacun des signaux contenait 2048 points. Ensuite, les paramètres ont été mesurés et calculés par AEwin^{MD}, un logiciel capable de calculer et mesurer en temps réel les paramètres sur un ordinateur. La figure 3.1 montre le schéma du montage expérimental et la figure 3.2 donne un aperçu de l'installation des capteurs sur la lame pendant le crêpage en usine.

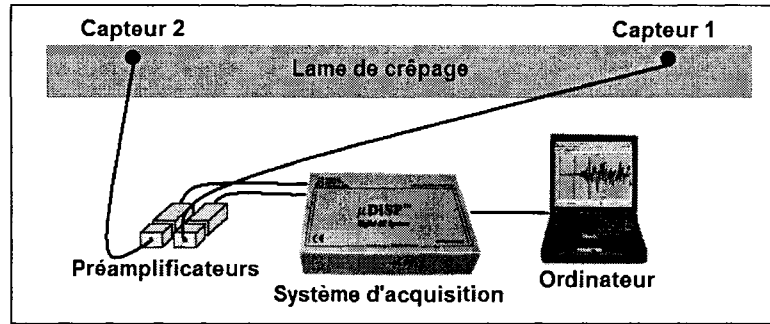


Figure 3.1 : Schéma du montage expérimental permettant de faire l'acquisition des signaux d'émission acoustique

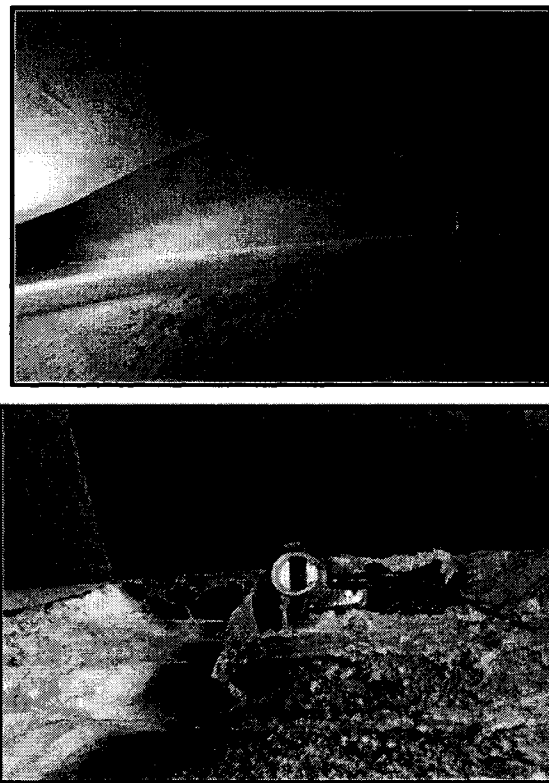


Figure 3.2 : Photos du montage expérimental permettant de faire l'acquisition des signaux d'émission acoustique

Les paramètres d'émission acoustique calculés par le système PAC sont analysés sous la forme de distribution en fonction du temps de crépage et ce, pour toutes les lames testées. Cette étape permet d'évaluer qualitativement l'évolution du paramètre RMS et de la fréquence moyenne en fonction du temps d'exposition à l'usure des lames. Ces deux paramètres ont été sélectionnés en raison de leur pouvoir de discriminer entre les

différents états évolutifs des phénomènes d'usure. Ainsi, il est possible de suivre l'état d'usure de la lame en temps réel durant le procédé de crêpage.

Ensuite, pour chaque lame, une projection des paramètres RMS et fréquence moyenne a été réalisée, afin de bien discerner la différence des comportements des lames les unes par rapport aux autres. Lors de cette étape, les différentes lames testées sont séparées en trois groupes classés en fonction du grade de papier et de l'amplification utilisée lors de l'acquisition des signaux d'émission acoustique. Un premier groupe correspond au grade de papier 1 avec une amplification des signaux de 40 dB, un deuxième groupe correspond au grade de papier 2 avec une amplification des signaux de 40 dB et enfin un troisième qui correspond au grade de papier 2 avec une amplification des signaux de 20 dB. Chaque groupe est à son tour séparé en deux pour chacun des canaux. Étant donné les grandes différences observées dans l'amplitude des signaux d'émission acoustique entre certains tests, cette séparation en groupes s'est avérée nécessaire.

Une analyse en composantes principales des paramètres d'émission acoustique à l'aide du logiciel Noesis^{MD} est ensuite appliquée aux signaux collectés pour chaque groupe de lame. Cette analyse de réduction des données permet de comparer les signaux associés aux différents comportements des lames entre elles. La première composante principale est alors représentée en distribution cumulative pour chacune des lames dans un même plan de projection. Enfin, les paramètres analysés sont corrélés aux données papier et aux données métallurgiques reliées aux lames usées.

4. RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Dans cette section, on présente les résultats des essais réalisés sur le papier et l'évolution des paramètres papier selon le temps, la position ou en fonction d'autres paramètres mesurés. Ensuite, les résultats des tests métallurgiques sur les lames sont traités. Ces résultats permettent de mieux comprendre les propriétés et le comportement des lames face à l'usure et de pouvoir connaître la géométrie optimum des lames. Par la suite, les résultats de l'approche de traitement des données d'émission acoustique sont présentés et les conclusions du suivi en temps réel du frottement des lames sur le yankee sont traitées. Finalement, la synthèse des résultats des trois domaines (papier, métallurgie et émission acoustique) est exposée. Cette synthèse permet de conclure sur les différents domaines et aide à établir les recommandations à proposer pour améliorer le procédé de crêpage de l'entreprise.

4.1 Résultats des tests sur le papier

4.1.1 Corrélations entre les différents paramètres de qualité du papier

Tel que présenté plus tôt dans ce mémoire, une dizaine de paramètres ont été définis pour essayer de caractériser au mieux la qualité du papier. Il est important de connaître dans quelle mesure ces différents paramètres sont reliés entre eux afin de pouvoir définir ceux qui recèlent le plus d'information quant à la qualité du papier. Il est à noter que toutes les données de papier ont été normalisées dans ce rapport pour des fins de confidentialité. Les différents échantillons de papier utilisés pour ces tests proviennent des lames L5CR003 à L5CR009. Les différentes données portent donc sur le grade de papier 1. Les figures 4.1 et 4.2 montrent deux exemples de corrélations entre les paramètres de qualité du papier.

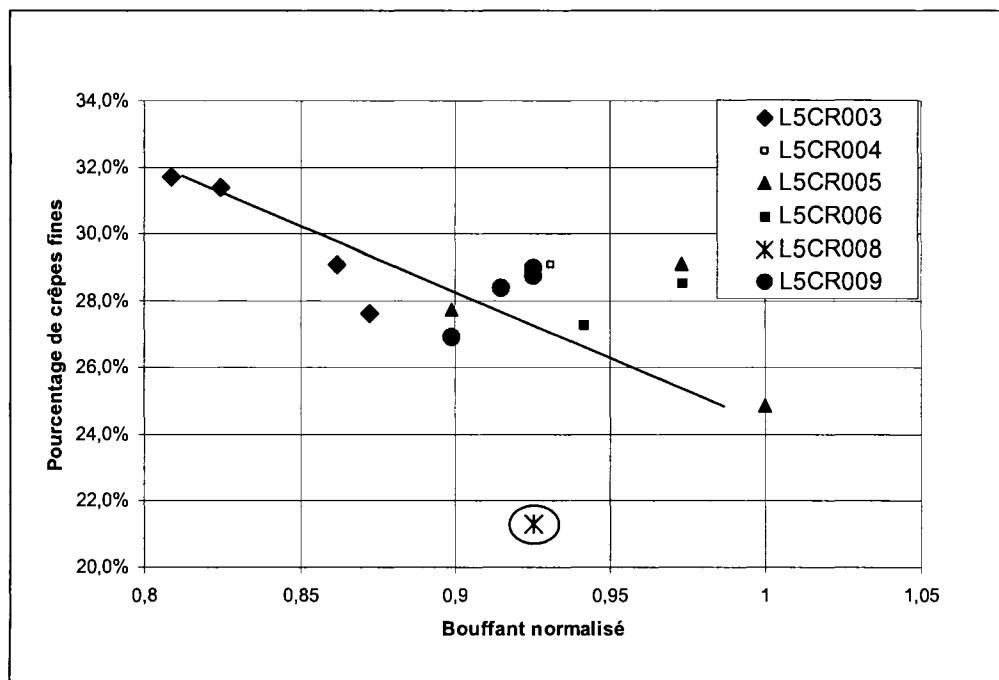


Figure 4.1 : Évolution du pourcentage de crêpes fines en fonction du bouffant normalisé

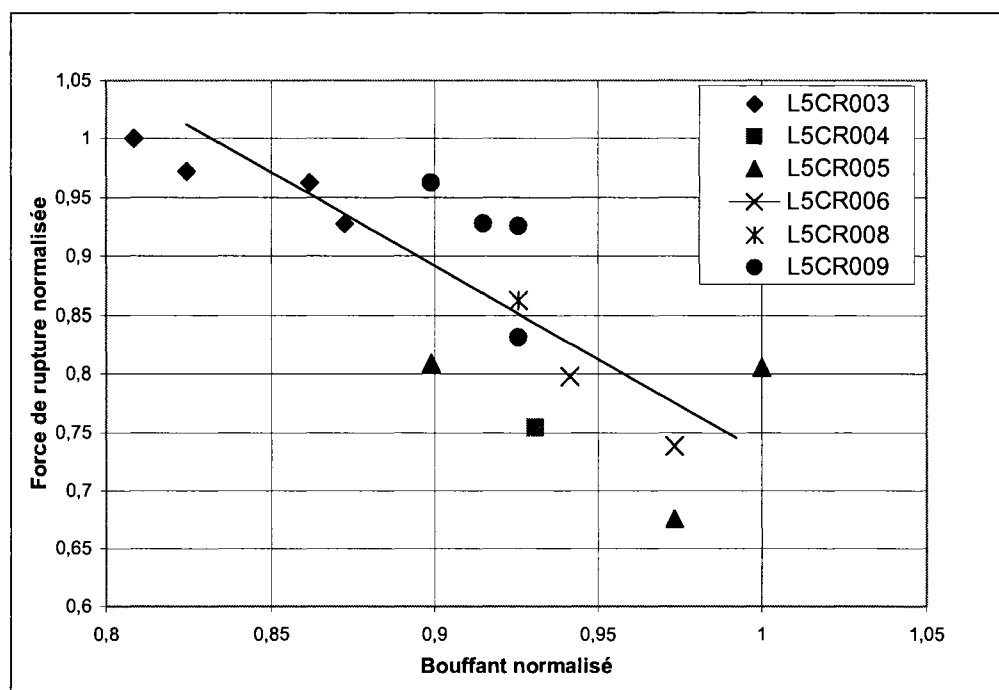


Figure 4.2 : Évolution de la force de rupture normalisée dans le sens machine en fonction du bouffant normalisé

En ce qui concerne les corrélations entre les différents paramètres papier, les conclusions suivantes ont été avancées à partir de ces dernières courbes et d'autres résultats :

- Lorsque le **bouffant** augmente, la **fréquence de crêpe** diminue. Or le bouffant apporte au papier sa douceur, et une fréquence de crêpe élevée rend le papier moins rugueux, plus agréable au toucher. Il y a donc nécessité de trouver un compromis entre ces deux paramètres afin d'avoir une qualité de papier optimale.
- Lorsque le **bouffant** augmente, les **forces de rupture** dans le sens machine et dans le sens transverse diminuent. En effet, lorsque la valeur associée au bouffant est grande, les fibres du papier sont éclatées (selon la théorie du crêpage), la feuille est moins dense donc la force qu'il faut appliquer pour la déchirer est plus faible que pour une petite valeur de bouffant. À nouveau, il est nécessaire de trouver un compromis entre ces deux paramètres, car pour avoir un papier de bonne qualité il faut qu'il soit à la fois résistant et épais.
- Pour avoir un bon crêpage, le modèle théorique (théorie du crêpage) prédit qu'il faut une fréquence de crêpe et un bouffant élevés et une largeur de crêpe faible.
- Selon la théorie du crêpage, la **qualité de papier de l'entreprise** se situe vers la fin de la **zone de flambage** (figure 4.3). Il faudrait donc augmenter la fréquence de crêpe tout en gardant un bouffant élevé pour avoir une meilleure qualité et ainsi se trouver dans la zone d'explosion des fibres.

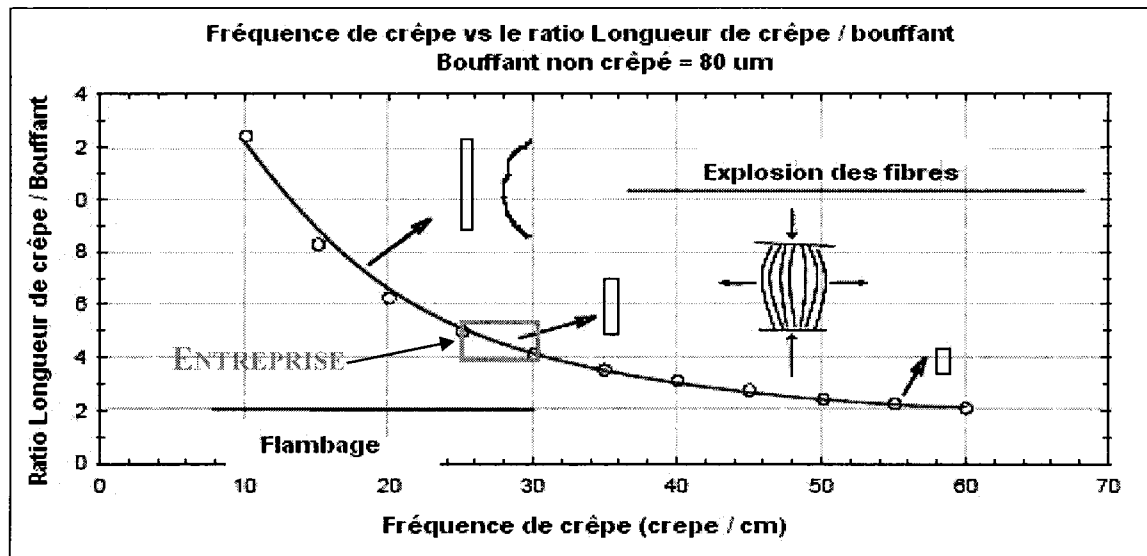


Figure 4.3 : Théorie du crêpage

- En conclusion, les paramètres identifiés les plus significatifs quant à la qualité du papier sont les suivants :
 - **Bouffant**
 - **Fréquence de crêpe et autres paramètres reliés (pourcentage de crêpes fines, petites, moyennes, etc.)**
 - **Résistance sens machine et sens transverse et autres paramètres reliés (GMT, BLAH)**
 - **Poids de base**

4.1.2 Résultats des tests sur le papier en relation avec les objectifs de qualité définis par l'entreprise

Pour chacune des lames testées, des échantillons de papier ont été récupérés et analysés. Deux grades de papier ont été produits lors de ces tests, soit le grade 1 et le grade 2. Pour chacun de ces grades, il existe des valeurs limites bien définies en ce qui concerne les objectifs à atteindre, définis par l'entreprise, pour les différents paramètres de qualité du papier. Le tableau 4.1 montre ces différentes balises pour quelques paramètres papier pour ces deux grades.

Tableau 4.1 : Objectifs normalisés à atteindre pour certains paramètres papier pour les grades 1 et 2

Grade	Objectifs	Poids de base (BW) normalisé	Bouffant normalisé	Allongement normalisé	Force rupture Sens machine (RESM) normalisé	Force rupture Sens travers (REST) normalisé
Grade 1	Max	1	1	1	0,87272727	0,76190476
	Objectif	0,95588235	0,94623656	0,86956522	0,78181818	0,66666667
	Min	0,91666667	0,90322581	0,73913043	0,61818182	0,61904762
Grade 2	Max	0,81372549	0,86021505	0,86956522	1	1
	Objectif	0,7745098	0,77956989	0,76086957	0,81818182	0,71428571
	Min	0,73529412	0,69892473	0,65217391	0,63636364	0,57142857

Il est possible de classer les échantillons de papier recueillis lors des tests selon qu'ils atteignent ou non les objectifs prédéfinis pour chaque grade. Les figures 4.4 à 4.7 montrent des histogrammes qui présentent la position des valeurs mesurées sur les échantillons des lames testées par rapport aux objectifs fixés. Le bouffant et le BLAH sont ainsi présentés. Le BLAH est un paramètre calculé à partir des forces de rupture et du poids de base. Il est défini par la relation :

$$BLAH = \sqrt{\frac{RESM * REST}{BW}} \quad (4.1)$$

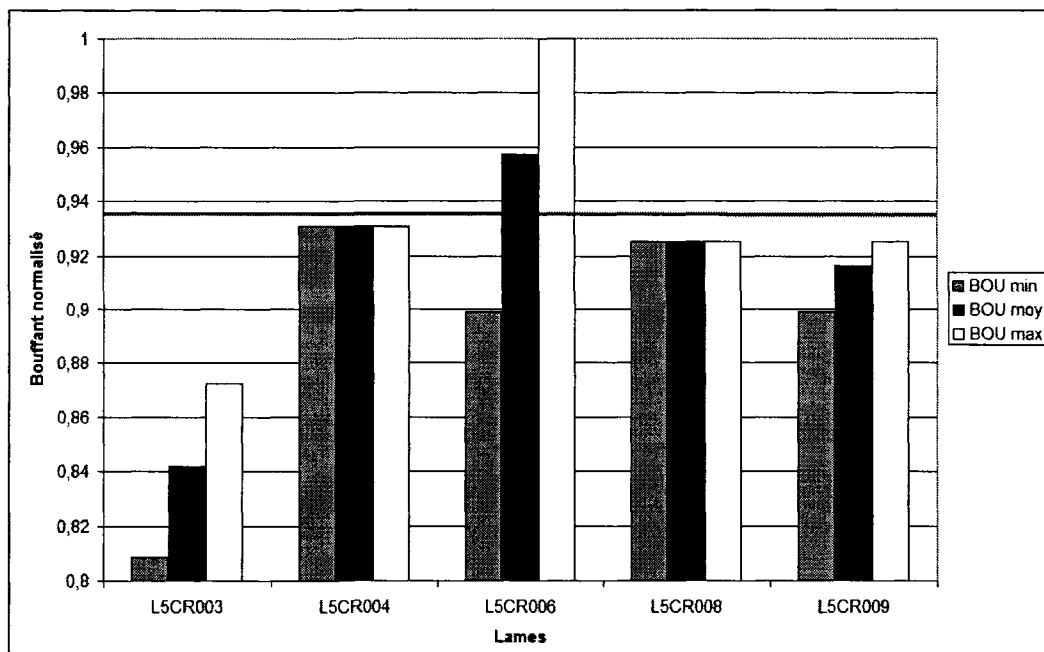


Figure 4.4 : Variation du paramètre bouffant obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 1

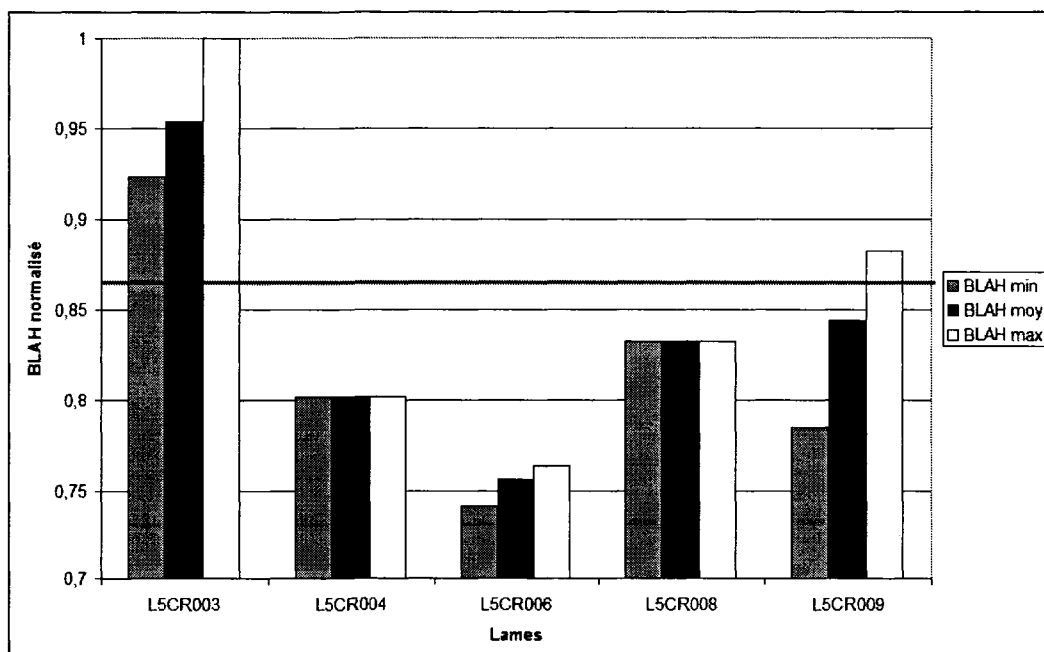


Figure 4.5 : Variation du paramètre BLAH obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 1

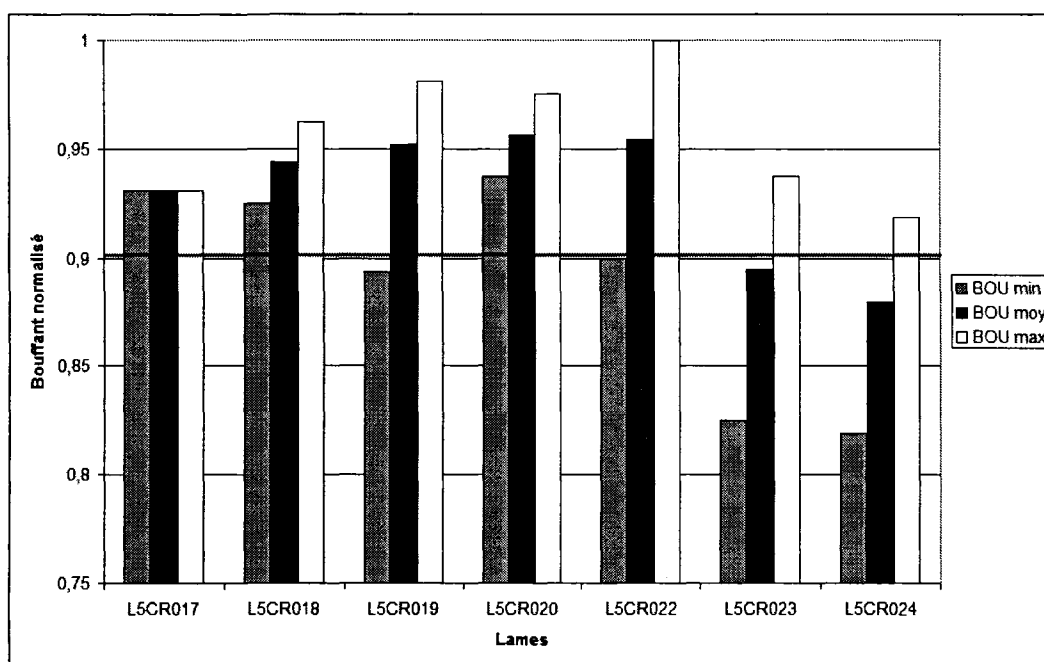


Figure 4.6 : Variation du paramètre bouffant obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 2

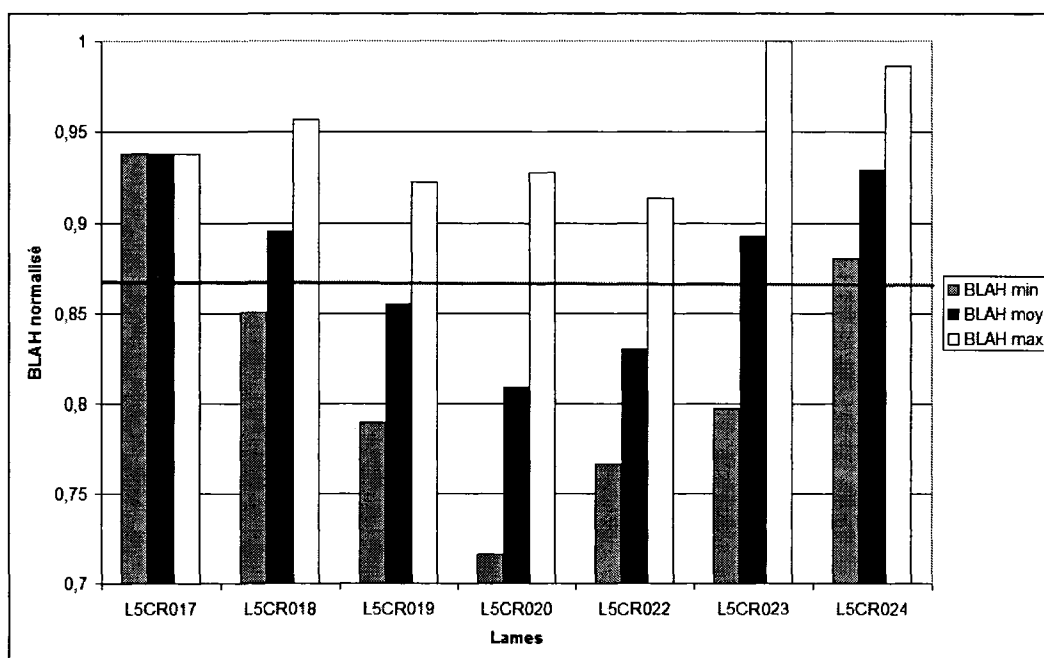


Figure 4.7 : Variation du paramètre BLAH obtenu sur les lames par rapport à l'objectif de qualité défini par l'entreprise pour le grade 2

Il est à noter que la ligne noire sur les graphiques représente l'objectif satisfaisant à atteindre pour chaque paramètre. On remarque sur ces histogrammes que certaines lames n'atteignent pas les objectifs fixés tandis que d'autres les dépassent largement. Il existe donc une variation non négligeable dans la qualité du papier produit pour un grade donné. Le bon ou le mauvais fonctionnement du procédé est la cause de cette variation. Le but recherché est de garder la qualité du papier au-delà des objectifs fixés et ce, de façon constante. La seule façon d'y parvenir est de contrôler le procédé de manière à ce que tous les paramètres qui le régissent restent eux aussi le plus possible constants.

4.1.3 Évolution des paramètres de qualité du papier en fonction du temps

Les paramètres de qualité du papier ont aussi été analysés en fonction du temps d'exposition à l'usure des lames. Le tableau 4.2 présente quelques résultats recueillis en juin 2006 qui montrent l'évolution de certains paramètres de qualité du papier pour le grade 2.

Tableau 4. 2 : Propriétés du grade de papier 2 en fonction du nombre de rouleaux suivant une lame (chaque rouleau représente environ 25 minutes de crêpage)

Paramètres	1^{er} rouleau	2^e rouleau	3^e rouleau	4^e rouleau	5-6^e rouleau	7^e rouleau
Poids de base normalisé	1	0,9875	0,9813	0,9813	0,9875	0,9875
Bouffant normalisé	0,9097	0,9513	0,9861	1	1	0,9861
ratio bouffant/ poids de base normalisé	0,8901	0,9450	0,9780	1	0,9890	0,9780
Allongement normalisé	0,9836	1	0,9781	0,9617	0,9234	0,9562
BLAH normalisé	1	0,9285	0,9175	0,8681	0,8901	0,8791
RSMC (force humide) normalisée	1	0,9673	0,9565	0,8695	0,9347	0,9239
Fréquence de crêpe normalisée	1	0,9825	0,9730	0,9666	0,9634	0,9619

En ce qui concerne l'évolution des différents paramètres papier en fonction du temps, les conclusions suivantes sont avancées :

- Le **bouffant** tend à augmenter avec le temps
- L'**allongement** tend à diminuer en fonction du temps
- La **fréquence de crêpe** et les **résistances** dans les sens machine et transverses ont tendance à diminuer en fonction du temps. L'explosion des fibres serait à l'origine de ce phénomène.
- L'évolution en fonction du temps de la **force de rupture dans le sens transverse** ou celle de la **force humide** est la même que celle de la **force de rupture dans le sens machine**
- Le **ratio force humide/sèche** semble varier avec l'âge de la lame
- Le **poids de base** du premier rouleau est plus élevé que pour les autres rouleaux crêpés

Les graphiques, relatifs au tableau 4.2, qui montre les tendances des paramètres papier en fonction du temps sont consignés en Annexe I.

4.1.4 Évolution des paramètres de qualité du papier en fonction du temps pour un même rouleau

Certains tests effectués en mai 2007 ont permis de voir l'évolution de certains paramètres de qualité du papier en fonction de la position de l'échantillon dans le diamètre du rouleau. Ces tests ont été effectués sur les échantillons de papier provenant de la lame L5CR023. Lors de ces tests, des marques étaient faites dans le diamètre des rouleaux de papier à toutes les 5 minutes. Il a alors été possible de prendre des échantillons à ces positions exactes en déroulant le papier des rouleaux. Ensuite, ces échantillons ont été analysés afin de voir l'évolution de la qualité du papier selon la position dans le diamètre. Les figures 4.8 à 4.11 montrent l'évolution de certains paramètres en fonction de la position dans le diamètre pour la lame L5CR023 ayant produit 5 rouleaux. Il est à noter que le mandrin signifie le centre du rouleau, chronologiquement au début de l'enroulement, tandis que le dessus correspond à la fin de l'enroulement.

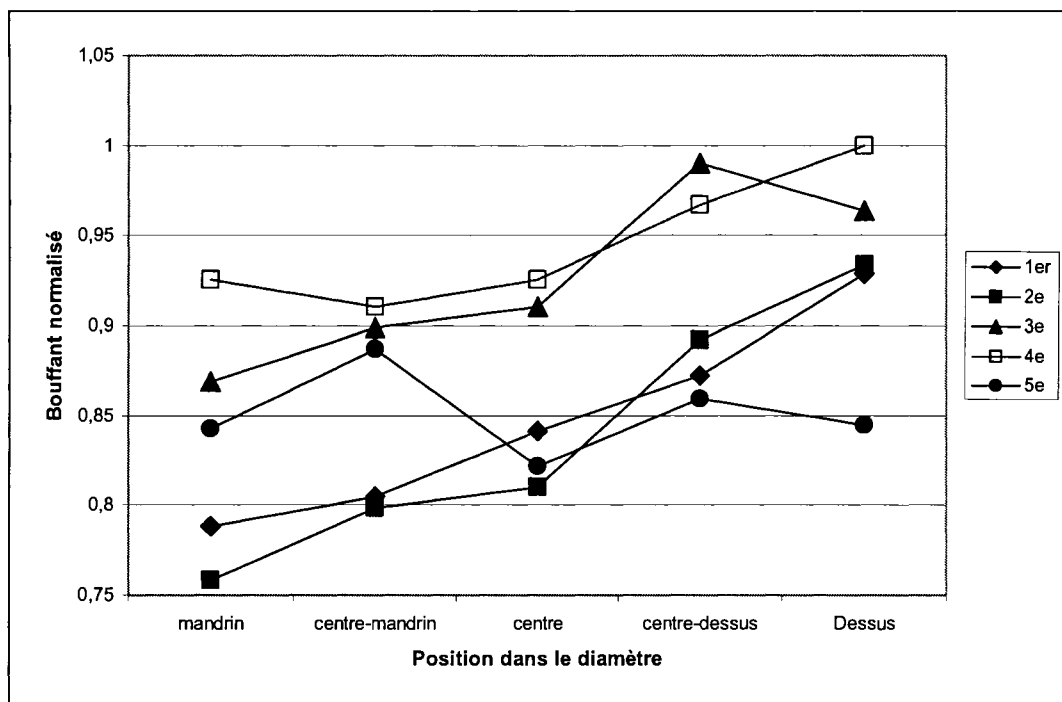


Figure 4.8 : Variation du bouffant normalisé selon le diamètre (L5CR023)

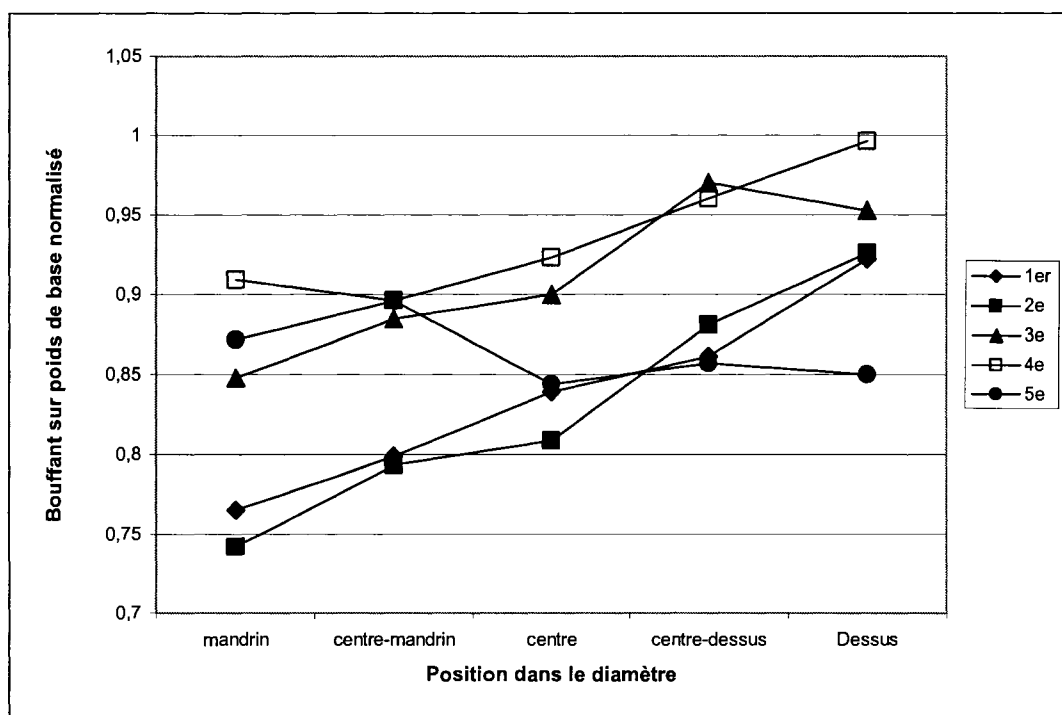


Figure 4.9 : Variation du paramètre bouffant sur poids de base normalisé selon le diamètre (L5CR023)

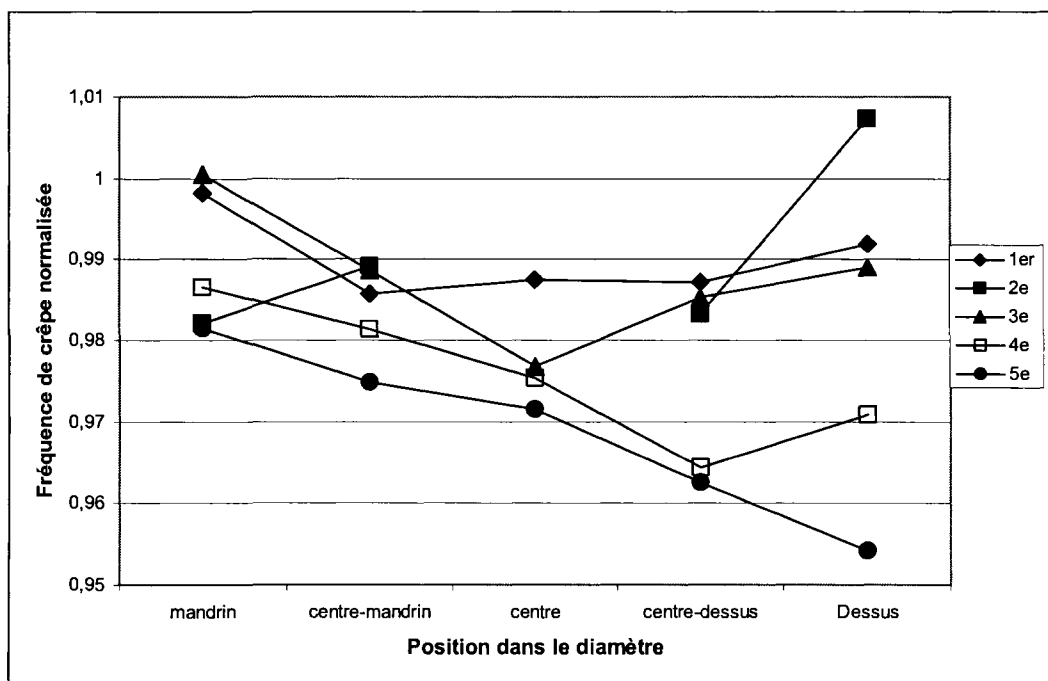


Figure 4.10 : Variation de la fréquence des crêpes normalisée selon le diamètre (L5CR023)

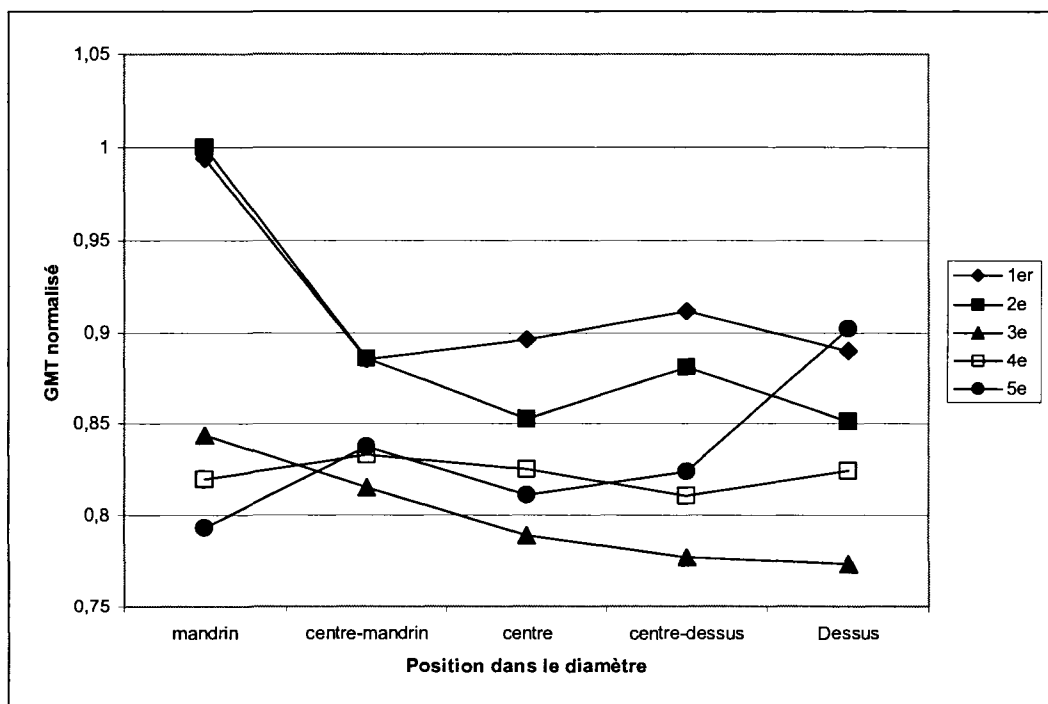


Figure 4.11 : Variation du paramètre GMT normalisé selon le diamètre (L5CR023)

Certaines constatations très intéressantes peuvent être formulées en analysant ces résultats. Premièrement, il semble que pour un même rouleau, les paramètres de qualité de papier varient beaucoup selon que l'échantillon se retrouve au centre ou à l'extérieur du rouleau. Il y a une augmentation marquée du bouffant selon la position du diamètre. Plus l'échantillon de papier est pris sur l'extérieur du rouleau, plus son bouffant est élevé. Incidemment, les autres caractéristiques suivent les corrélations observées entre les différents paramètres de qualité du papier. Ainsi, la fréquence de crêpe et les forces de rupture (GMT) ont tendance à diminuer avec le temps pour un même rouleau. L'évolution de ces différents paramètres en fonction du temps pour un même rouleau est substantielle. Pour le bouffant, cette augmentation atteint 23% pour le 3^e rouleau. Pour ce qui est du GMT, c'est une diminution de 15 % qui est remarquée pour le 2^e rouleau. Ces fluctuations sont très importantes car pour un même rouleau, il se peut qu'il y ait des parties qui répondent aux exigences d'un grade de papier en particulier tandis que d'autres non.

Il existe des explications plausibles pour interpréter ces variations. Premièrement, il se peut que l'augmentation du bouffant et la diminution des forces et de la fréquence de crêpe soient reliées au comportement des lames de crêpage, en effet on déjà constaté, les résultats seront données plus loin, que les paramètres qualité tels que le bouffant s'améliorent en fonction du temps d'utilisation de la lame. Cependant, dans les résultats par les figures précédentes il faut tenir compte de la distorsion induite par l'enrouleuse. En effet, le papier situé au centre du rouleau est comprimé par le reste du papier. Plus il est comprimé, autrement dit, plus il est situé au centre, plus son épaisseur est petite. Cependant une autre explication serait possible quant à ces variations. Il se peut que ces fluctuations soient dues à l'effet de la lame de nettoyage puisque celle-ci est changée au début de chaque nouveau rouleau. Il semblerait que plus l'usure de la lame est prononcée, plus le papier produit possède un bouffant élevé et des forces faibles. Malgré ces suppositions, l'augmentation du bouffant observée à la fin est synonyme d'amélioration de qualité du papier malgré la compression induite sur l'épaisseur par l'enrouleuse. Pour vérifier l'effet de la lame de nettoyage, il faudrait omettre de la changer au début d'un nouveau rouleau et voir l'effet que cela aurait sur la qualité du papier produit. Il est aussi possible que ces phénomènes soient le résultat de l'action combinée de l'enrouleuse et de la lame de nettoyage.

4.1.5 Évolution des paramètres papier selon la position sur la longueur de la lame (largeur du rouleau)

Certains tests effectués en février 2007 ont permis de voir l'évolution de certains paramètres de qualité du papier en fonction de la position de l'échantillon sur la longueur de la lame. Ces tests ont été effectués sur les échantillons de papier provenant de la lame L5CR019. Lors de ces tests, 4 échantillons de papier ont été pris sur la longueur de la lame, et ce pour chaque rouleau produit. Pour ce faire le rouleau de papier a été divisé en quatre zones distinctes égales en longueur et les échantillons ont été analysés :

- F : Avant (Front) à environ 35 cm du bord côté opérateur (capteur 1)
- FC : Avant centre (Front Center) à environ 105 cm du bord côté opérateur (capteur 1)
- BC : Arrière centre (Back Center) à environ 175 cm du bord côté opérateur (capteur 1)
- B : Arrière (Back) à environ 245 cm du bord côté opérateur (capteur 1)

Étant donné la perte de certains rouleaux lors du transport entre Lennoxville et Crabtree, seulement les résultats des 2^e, 3^e, 4^e et 6^e rouleaux ont été analysés. Les figures 4.12 à 4.16 montrent l'évolution de certains paramètres de qualité du papier en fonction de la position sur les rouleaux de la lame L5CR019.

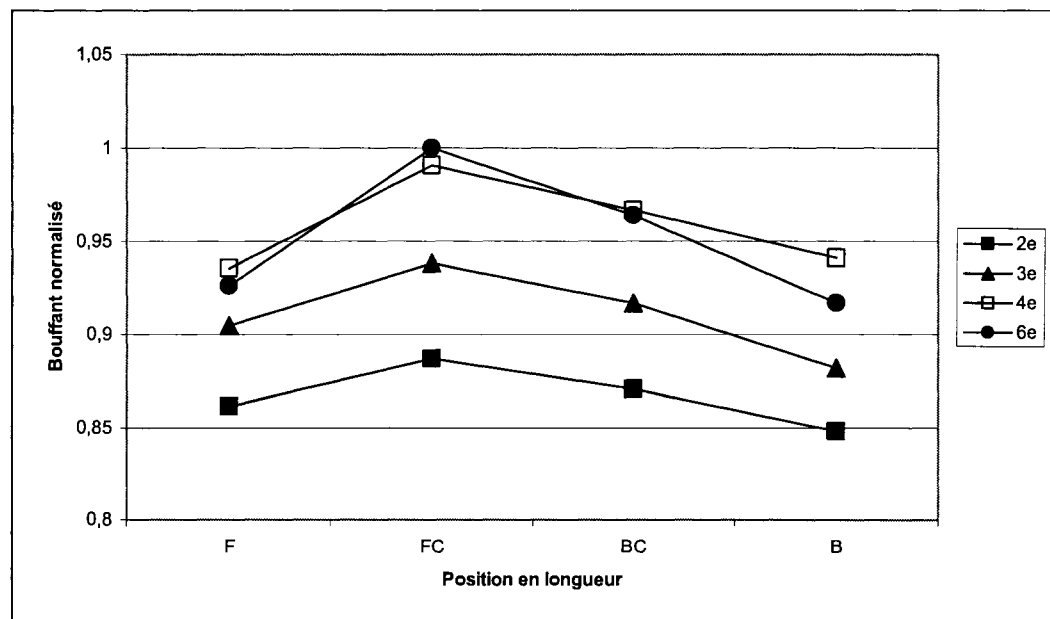


Figure 4.12 : Variation du Bouffant normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)

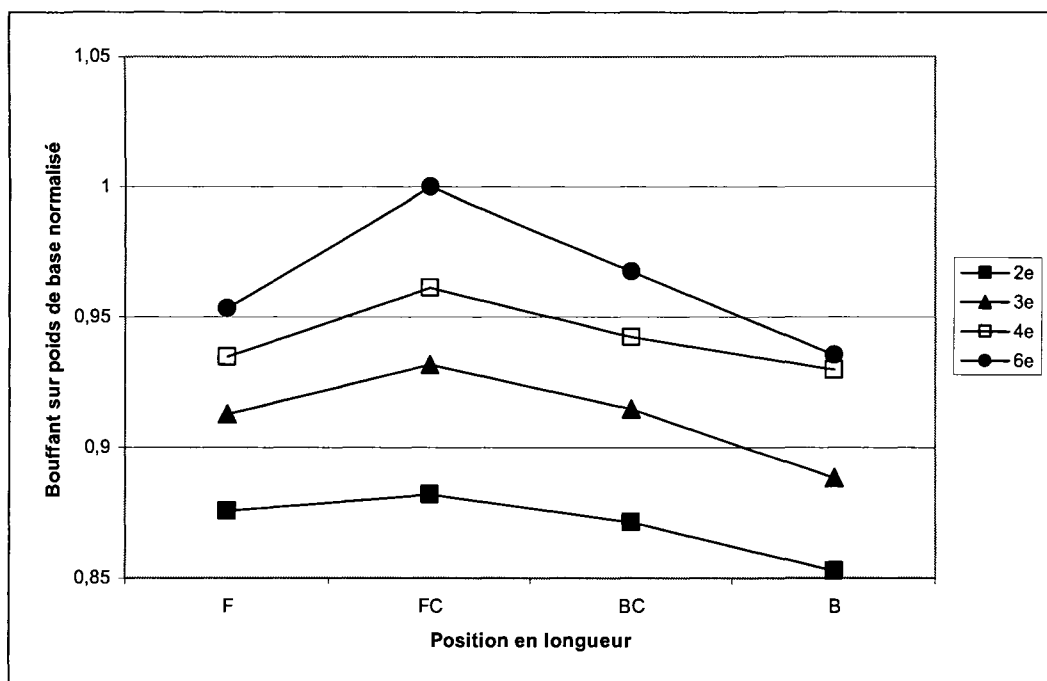


Figure 4.13 : Variation du paramètre Bouffant sur poids de base normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)

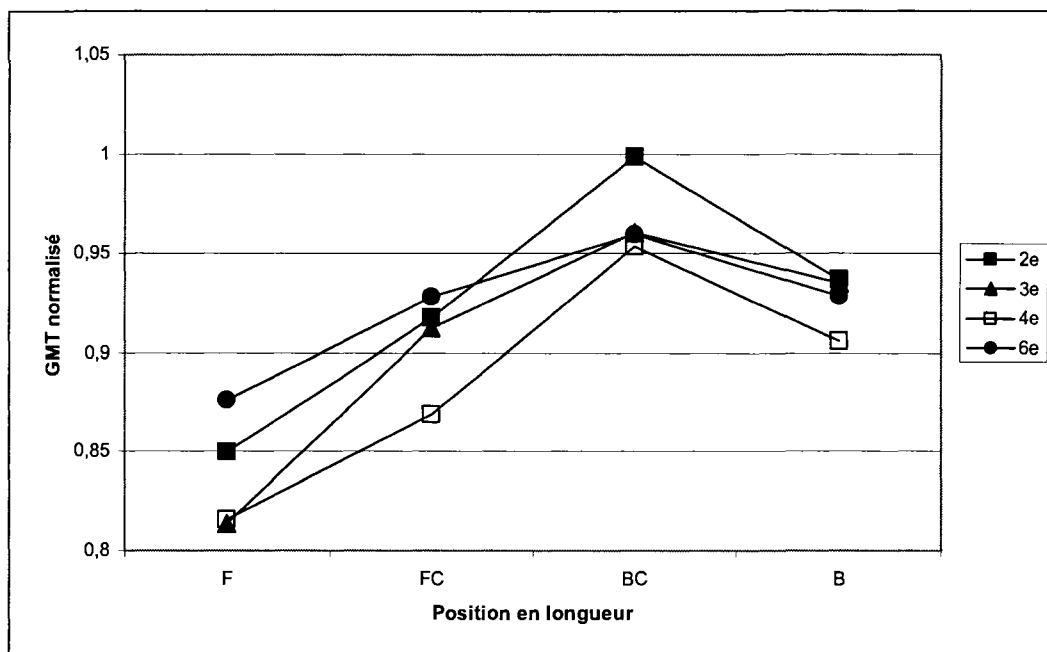


Figure 4.14 : Variation du paramètre GMT selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)

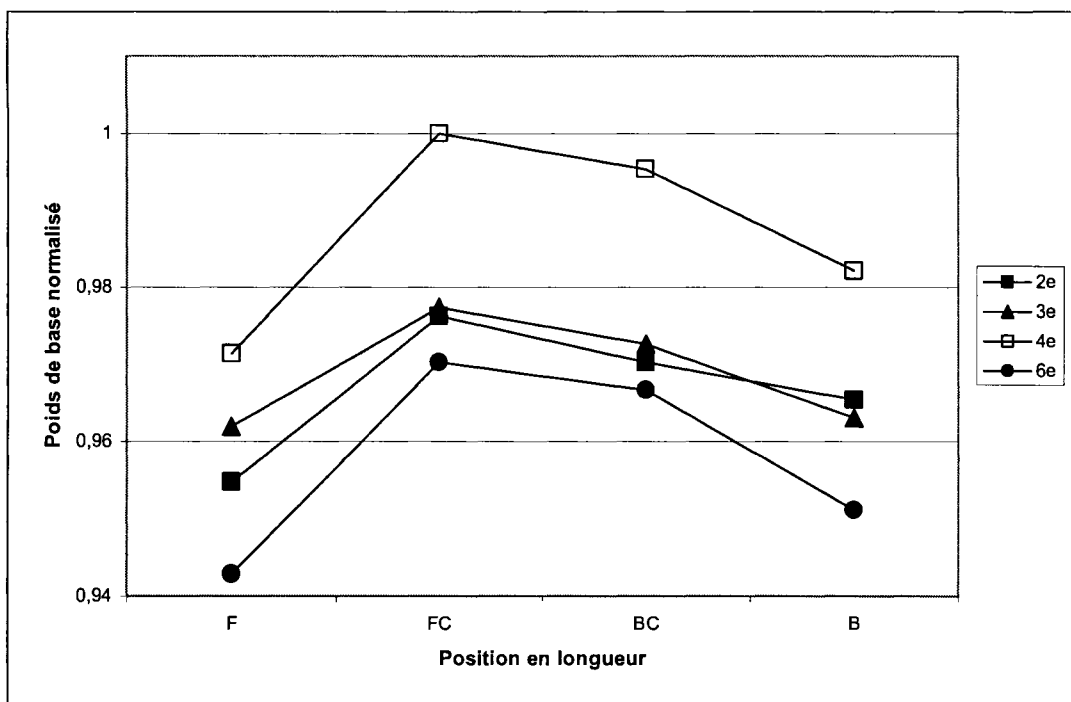


Figure 4.15 : Variation du poids de base normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)

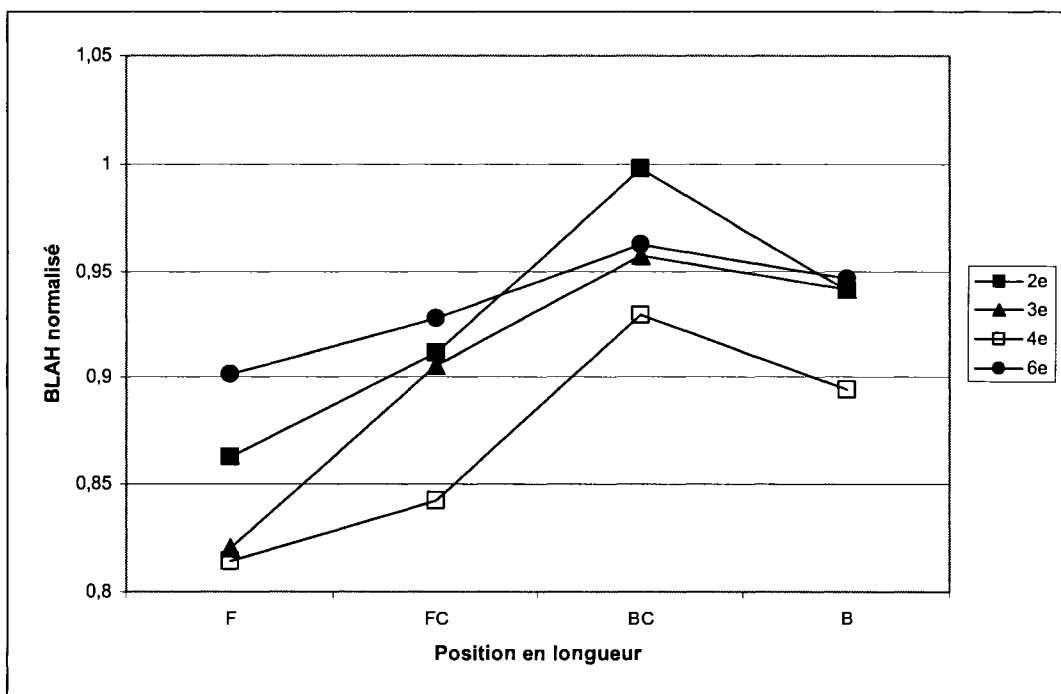


Figure 4.16 : Variation du paramètre BLAH normalisé selon la position sur la longueur de la lame (L5CR019)

On remarque à partir de ces résultats qu'il existe une grande variation dans la qualité du papier selon la position sur la longueur de la lame qu'occupe l'échantillon testé. Il est clair qu'il existe une différence marquée dans la valeur de certains paramètres en rapport avec leur position dans la largeur du même rouleau. Les échantillons au centre ont toujours des paramètres avec des valeurs plus élevées qu'aux extrémités. Ainsi, le bouffant, les forces et le poids de base sont plus grands au milieu que sur les côtés.

Deux phénomènes peuvent expliquer cette constatation : la non homogénéité de la quantité de pâte le long de la feuille et le contact plus ou moins constant entre la lame et le yankee, autrement dit la variation de la pression appliquée sur la longueur de la lame. Il semble qu'il y a plus de pâte à papier au centre de la feuille qu'aux extrémités et que le contact entre la lame et le yankee soit meilleur au centre qu'aux extrémités. Il sera intéressant de regarder plus en profondeur ce phénomène lors de l'analyse des lames dans la prochaine section.

Il est à noter qu'une grande amélioration pourrait être réalisée dans l'uniformisation de la qualité du papier le long de la lame en étant en mesure de ramener la qualité du papier des extrémités au même niveau que celle mesurée du centre de la feuille.

4.2 Résultats des essais métallurgiques sur les lames

4.2.1 Tests de dureté Rockwell C sur les lames en fonction de la position et du temps d'exposition à l'usure

Le premier des tests effectués sur les lames est la mesure de la dureté Rockwell C. Ce test de dureté a été choisi parmi les autres parce que la gamme de dureté qu'il permet de mesurer coïncide bien avec la dureté théorique de l'acier des lames. Ainsi, pour les lames L5CR007 (5 min), L5CR008 (21 min), L5CR004 (50 min) et L5CR003 (90 min), des tests de dureté Rockwell C ont été menés à tous les 25 centimètres à partir du côté de la lame sur lequel est apposé le capteur 1. Ces tests ont été faits aussi bien au bord des lames (environ 1 mm de la pointe usée) qu'au centre de celles-ci. L'évolution de cette dureté permet de voir si des différences existent entre les différentes durées de vie de lame autant du côté de l'usure qu'au centre. De 3 à 4 mesures ont été prises à chacun des endroits précités afin d'avoir un résultat moyenné de la dureté à ces endroits. La figure 4.17 montre les emplacements longitudinaux des tests sur la lame.

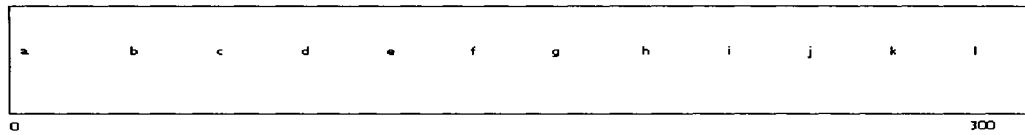


Figure 4.17 : Emplacement des tests de dureté sur les lames

Les figures 4.18 à 4.21 présentent ces différentes évolutions longitudinales de la dureté Rockwell C pour les quatre lames étudiées.

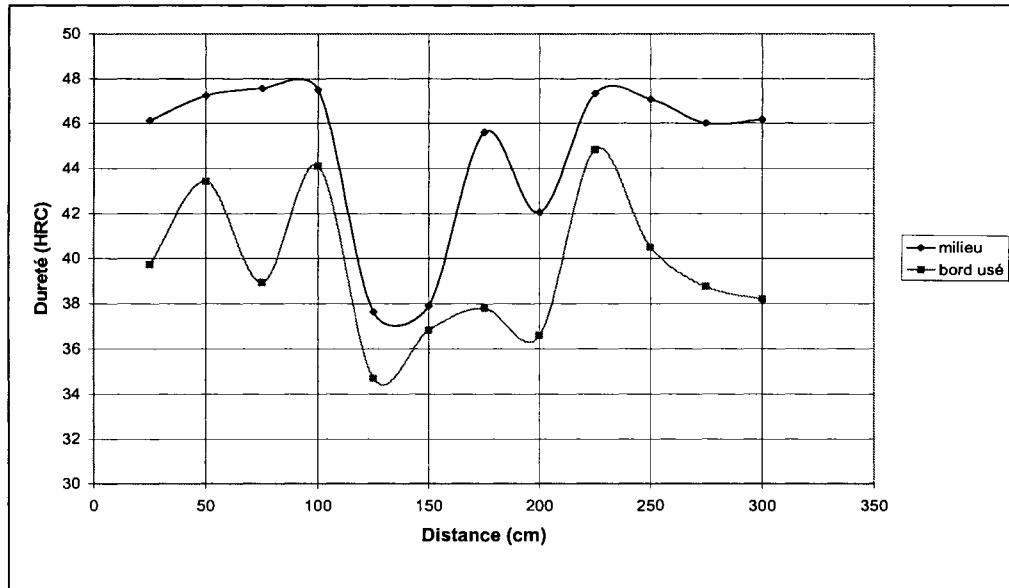


Figure 4.18 : Évolution de Dureté sur la longueur de la lame L5CR007 (5 min)

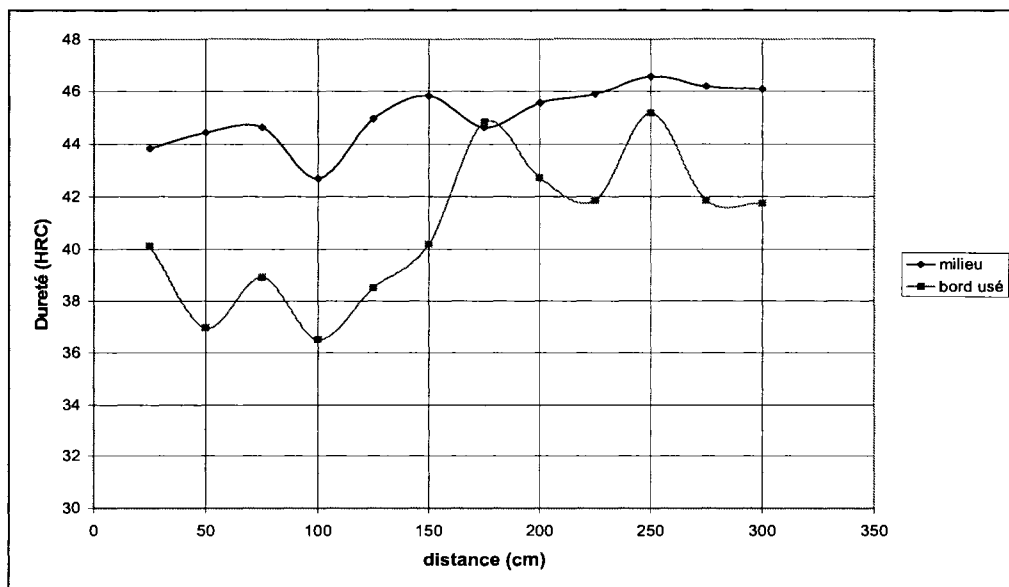


Figure 4.19 : Évolution de la dureté sur la longueur de la lame L5CR008 (21 min)

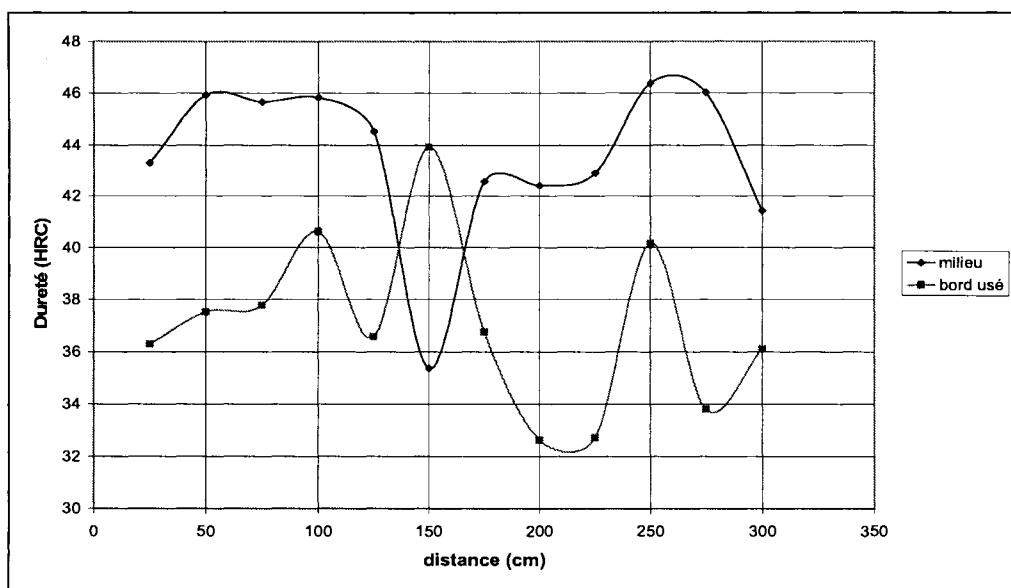


Figure 4.20 : Évolution de la dureté pour la lame L5CR004 (50 min)

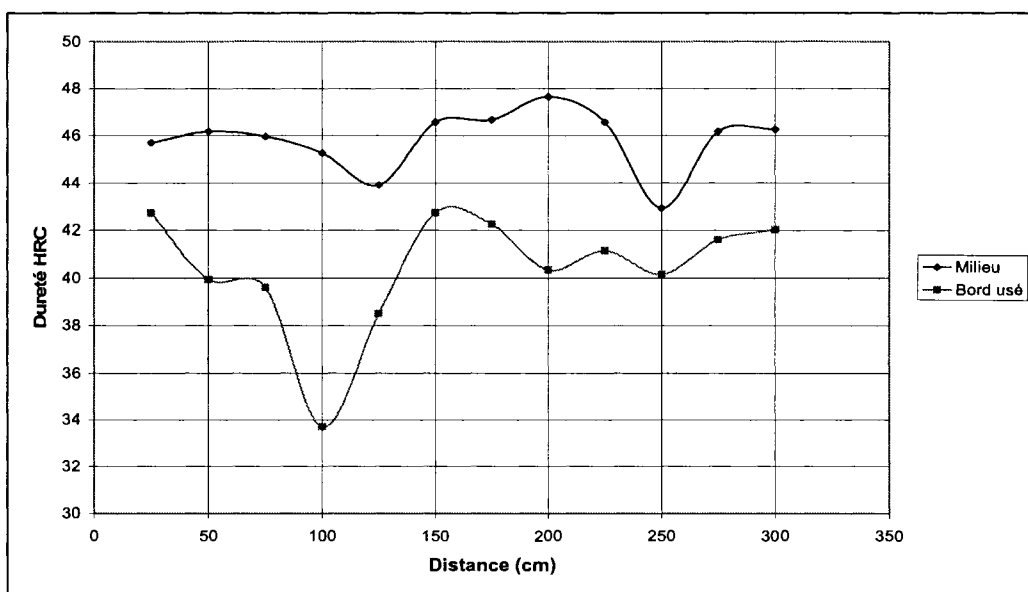


Figure 4.21 : Évolution de la dureté pour la lame L5CR003 (90 min)

Plusieurs faits intéressants peuvent être tirés de ces dernières figures. Tout d'abord, on remarque que la dureté est normalement plus élevée au milieu de la lame qu'à l'extrémité où se produit l'usure. Cette différence oscille en moyenne de 2 à 12 HRC. Deuxièmement, on peut voir que la dureté n'est pas constante sur toute la longueur des lames et ce, qu'on se retrouve au milieu ou du côté de la pointe usée. Cette constatation

montre bien que l'effet induit par le frottement n'est pas uniforme sur la longueur des lames. Cette variation est le résultat dû au frottement non uniforme des lames sur le Yankee et de la transformation microstructurale du matériau des lames due à l'élévation de la température lors du frottement lame-yankee. Certaines lames doivent frotter plus en quelques points bien précis à cause d'une pression plus forte appliquée sur ces points, ce qui emmène la lame à s'user plus vite à ces endroits. La chute de dureté est reliée la variation de la microstructure et à l'apparition des déformations plastiques (ramollissement) durant l'échauffement du matériau. De plus, on peut noter aussi que tout comme la dureté de la zone d'usure, celle du milieu de la lame a aussi tendance à être non uniforme. Des écarts de près de 11 HRC ont été mesurés pour les lame L5CR004 et L5CR007. Ces écarts sont très grands quand on pense que la lame est supposée être uniforme sur toute sa longueur. Une autre remarque intéressante à noter est celle du parallélisme des courbes de dureté du bord usé des lames comparativement à celles du milieu des lames. En effet, mis à part le point de la lame L5CR004 situé à 150 cm, les courbes de dureté sont assez parallèles. Il semble que lorsque la dureté chute, elle chute tout aussi bien au milieu de la lame que du côté du bord usé de celle-ci. Cette non uniformité des propriétés mécaniques est reliée au procédé de fabrication et aux traitements thermiques initialement appliqués sur les lames d'origine. Une des hypothèses plausibles est que lors du laminage des lames, la pression des laminoirs n'est pas uniforme le long de la lame et l'écrouissage n'est donc pas constant ou peut-être que lors des traitements thermiques appliqués durant le procédé de fabrication, la martensite (phase dure de l'acier) n'est pas répartie uniformément dans la pièce. Toutefois, ces interrogations ne pourront être résolues que lorsque des explications précises sur le procédé de fabrication des lames seront fournies.

Maintenant, il est important de voir comment cette dureté se manifeste selon le temps d'exposition à l'usure. La figure 4.22 montre la dureté moyennée le long de lame selon le temps d'utilisation.

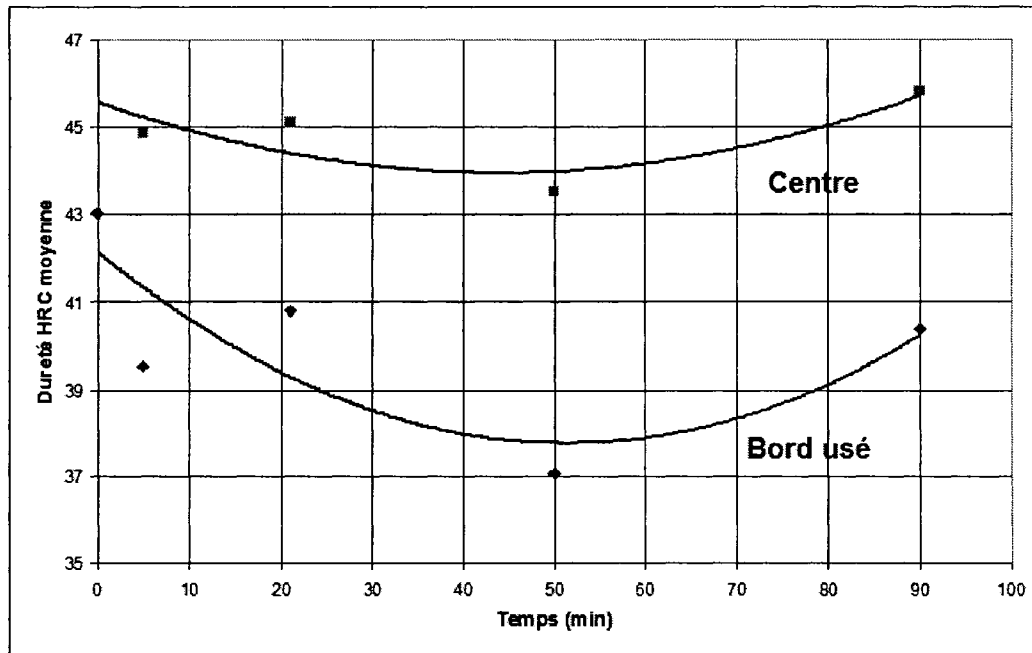


Figure 4.22 : Évolution de la dureté des lames selon le temps d'exposition à l'usure

Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, la dureté des lames ne diminue pas constamment avec la durée d'exposition à l'usure. La plus petite dureté est observée à 50 minutes autant pour le milieu que pour le bord usé tandis que la plus grande valeur est observée à 90 minutes pour le milieu de la lame et à 21 minutes pour le bord usé de la lame. En première conclusion, la lame voit sa dureté chuter rapidement, du côté de la zone de frottement la chute est plus prononcée, après 50 minutes d'exposition au frottement on observe un durcissement de la lame. Cependant, il est trop tôt pour tirer des conclusions sur l'évolution de la dureté des lames en fonction du temps, une étude sur la variation microstructurale par microdureté est entreprise plus loin afin de déceler les transformations induites par l'échauffement et le frottement qui permettront d'expliquer le ramollissement et le durcissement qui s'ensuit observés sur les lames sujettes aux frottements. Il est tout de même frappant de remarquer, encore ici, le parallélisme des courbes de dureté du milieu et du bord usé des lames. En résumé, les lames n'affichent pas des duretés uniformes, le processus de crêpage induit une variation des duretés au bout des lames tout le long du processus de crêpage. Ces variations ont pour conséquences des structures de crêpes différentes et par le fait même des grades de qualité variables.

4.2.2 Tests de microdureté Vickers sur les lames en fonction de la position et du temps d'exposition à l'usure

Pour analyser la microstructure au niveau de la pointe de la lame, des tests de microdureté Vickers ont été réalisés. Pour ce faire, des échantillons des lames de crêpage ont été placés dans un enrobage d'époxy afin de pouvoir observer les sections métallographiques des lames étudiées. Grâce au microscope optique, il a été possible de voir la zone d'usure de côté et d'être en mesure de faire des tests de microdureté Vickers en cinq points distincts. Le positionnement de ces cinq points est expliqué dans le tableau 4.3 et est illustré sur la figure 4.23.

Tableau 4.3 : Descriptions des emplacements des tests de microdureté

Position	Description de l'emplacement
1	Bas de la zone de frottement
2	Milieu de la zone frottement
3	Haut de la zone de frottement ou pointe de la lame
4	Zone d'impact du papier
5	Zone loin de l'usure

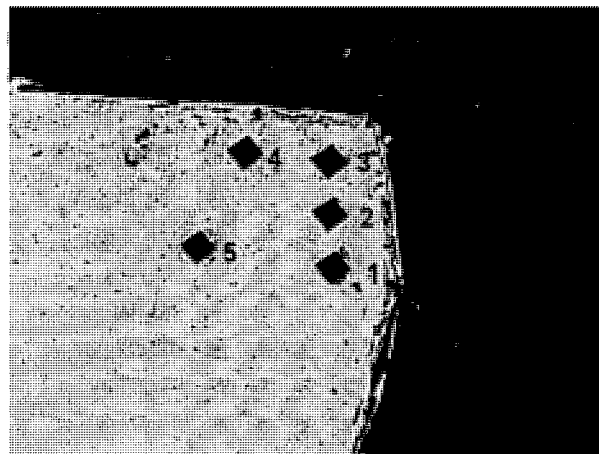


Figure 4.23 : Illustration des emplacements des tests de microdureté (L5CR004)

Ces tests de microdureté ont été menés sur 5 échantillons de lame. Les échantillons sont les suivants:

- L5CR003 à 100 cm (90 min)

- L5CR003 à 250 cm (90 min)
- L5CR004 à 100 cm (50 min)
- L5CR007 à 100 cm (5 min)
- L5CR003 à 100 cm (21 min)

Cet examen microscopique permet d'évaluer la microdureté de la lame en 5 endroits sur la pointe pour différentes lames afin de voir les emplacements où l'usure induit les baisses de dureté les plus prononcées. Il permet aussi de voir l'évolution de la microdureté de chacune des positions en fonction du temps d'utilisation des lames.

Les différentes mesures de microdureté des lames selon la position sont illustrées sur la figure 4.24.

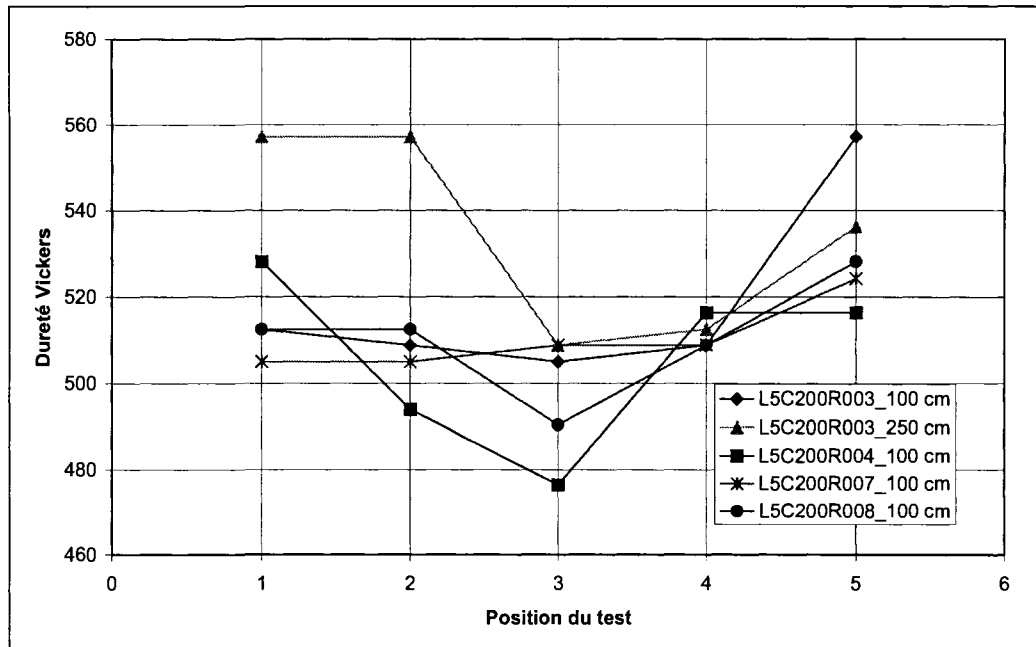


Figure 4.24 : Microdureté Vickers selon les lames et la position du test

On peut remarquer sur cette figure que la microdureté varie d'une position à l'autre sur une même lame. Cette variation va de 20 Hv (L5CR007) à environ 50 Hv (L5CR003). Ces écarts de dureté entre la position la moins dure et celle la plus dure pour une même lame sont d'autant plus grands que le temps d'exposition à l'usure est grand. Un autre fait qui est intéressant à noter sur cette dernière figure est que la position qui présente la dureté

la plus basse est pratiquement toujours la position 3 (pointe de la lame) tandis que celle qui présente normalement la dureté la plus grande est la 5 (zone loin de l'usure).

Cette tendance est d'autant plus évidente qu'elle est problématique. En effet, comme il a été mentionné plus tôt, l'emplacement du prélèvement numéro 3 est directement sur la pointe de la lame, là où il y a frottement avec le yankee. C'est donc à cet endroit que le phénomène d'usure débute. Par conséquent, le fait que la dureté chute précisément à cet endroit est un problème en soit puisque ces deux facteurs combinés favorisent évidemment l'usure de la pièce.

En ce qui concerne les autres points, aucune tendance notable n'a été remarquée. La gamme de microdureté des tests va de 476,5 Hv à 557,2 Hv ce qui correspond à une gamme de valeur qui va de 46,5 à 51 sur l'échelle Rockwell C. Cette gamme de valeur est beaucoup plus proche des valeurs spécifiées pour l'acier inoxydable martensitique 420 que les valeurs qui ont été mesurées directement avec le test de dureté Rockwell C. Les mesures de microdureté ont aussi été mises dans un graphique en fonction du temps d'usure des lames inspectées. Le résultat obtenu est illustré sur la figure 4.25.

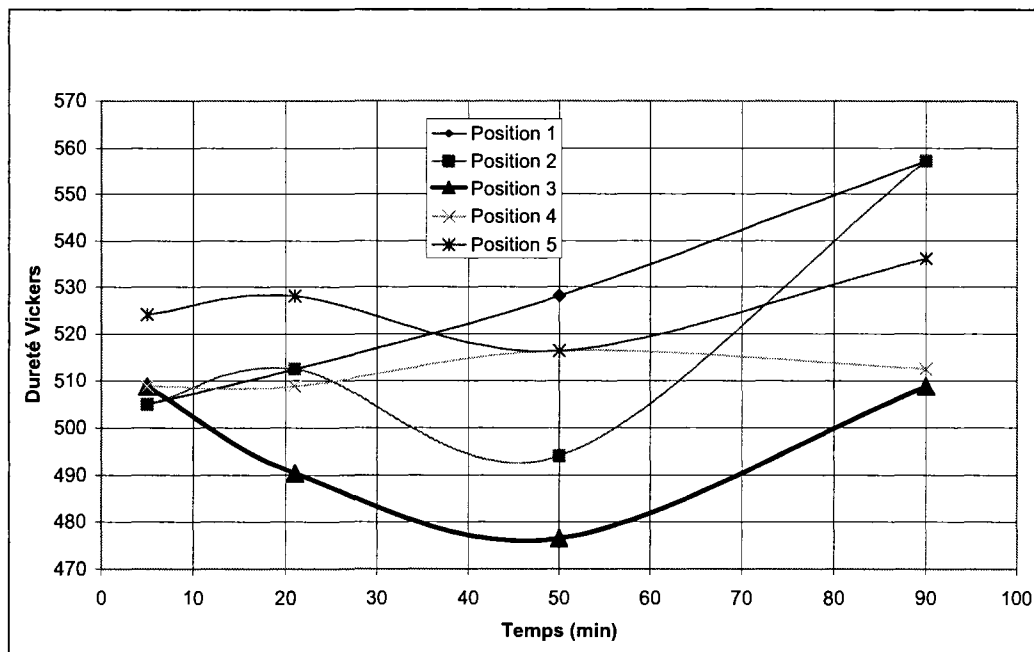


Figure 4.25 : Microdureté Vickers selon le temps d'exposition de la lame à l'usure

Ici encore, on remarque que la microdureté évolue selon le temps d'exposition de la lame à l'usure. Il semble que la microdureté la plus basse soit normalement atteinte au bout de

50 minutes après quoi un durcissement de la zone d'usure se fait pour les minutes qui suivent. La microdureté mesurée après 90 minutes est presque toujours la plus grande mesurée et ce pour toutes les positions sauf la position 4. Cette constatation vient confirmer les résultats obtenus dans la section 4.2.1 où l'on pouvait remarquer cette remontée de la dureté Rockwell C après un certain temps d'usure.

La baisse de dureté à la pointe de la lame peut s'expliquer par une hausse ponctuelle de la température due au frottement contre le yankee. Cette hausse de température, qui doit être supérieure à 150°C, entraîne un revenu et une décarburation de la surface de l'usure. En effet, le carbone se diffuse dans la ferrite et dans les grains de martensite qui changent de structure. Cette décarburation entraîne la baisse de la dureté observée, par conséquent, la pointe de la lame acquiert plus de ductilité. À cause des charges appliquées, la pointe de la lame subit des déformations plastiques aux points les plus sollicités. Après 50 minutes d'utilisation de la lame, les déformations plastiques induisent un écrouissage et donc un durcissement des pointes des lames qui se traduit par des valeurs de dureté élevées mesurées au bout de 90 minutes d'utilisation. Une analyse de microstructure est proposée afin de valider ces conclusions.

4.2.3 Analyse de la microstructure

Selon les tests de microdureté déjà effectués, il a été possible de constater que la pointe de la lame usée était plus molle et ce sur une très faible distance. L'hypothèse qu'un revenu puisse s'effectuer sur cette partie a été avancée. En raison de la friction avec le yankee ou bien lors de l'aiguisage, la température pourrait devenir très élevée localement. Un des buts de l'analyse de la microstructure est de valider cette hypothèse en plus de visualiser l'évolution de la microstructure en s'éloignant de l'usure.

Ainsi, un échantillon de la lame usée a été atteint chimiquement afin de faire ressortir la microstructure. La figure 4.26 présente cette microstructure.

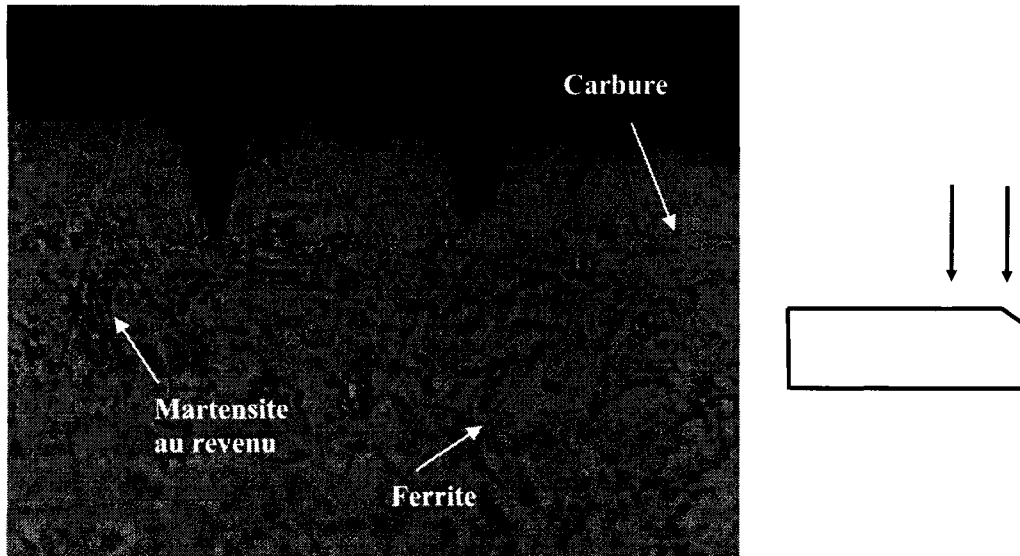


Figure 4.26 : Microstructure dans la zone d'usure de la lame

Dans cette figure, trois structures cristallines sont présentes. Tout d'abord, les carbures, constitués de carbone et de fer (Fe_3C), sont les points noirs visibles et distribués un peu partout. Ensuite, deux autres structures sont présentes, il y a les grains allongés et ombrés et les grains plus larges et homogènes. Il est très probable que la nature de ces grains puisse être de la martensite au revenu et de la ferrite.

Malgré que cette observation soit peu évidente sur les figures 4.26 et 4.27, il a été clairement constaté lors des tests de microscopie qu'il y a une plus faible concentration de carbures à la surface de l'usure. Cette observation vient vérifier le fait que cette section est plus molle car les carbures rendent le matériau plus dur. Ainsi, selon l'hypothèse d'un revenu local à cette section, les atomes de carbone se diffusent sur la surface près de l'usure. Malgré qu'il n'y ait aucune certitude sur la valeur exacte de la température atteinte lors de l'aiguisage ou bien de l'utilisation de la lame, l'hypothèse du revenu local semble très plausible.



Figure 4.27 : Microstructure de la lame usée vers le centre

Afin de vérifier les résultats obtenus, un test de microscopie électronique à balayage sur un échantillon d'une lame usée a été effectué. Encore une fois, la distribution de carbone au niveau de l'usure a été validée. Il y a une concentration moins importante de carbone à l'usure comparativement au centre de la pièce. Sur la figure 4.28, il y a la zone étudiée à gauche et la distribution du carbone à droite. La présence de carbone est obtenue en bombardant la surface avec des électrons. La modification de la configuration électronique des atomes émet une onde caractéristique ce qui permet de connaître la nature de l'atome.



Figure 4.28 : Dispersion du carbone sur la partie aiguisée de la lame neuve

Lors des tests de microscopie optique, un échantillon de la lame neuve aiguisée a été observé pour des fins de comparaison. Sur la figure ci-dessous, il est évident que la

concentration de carbures est supérieure pour cet échantillon que pour l'échantillon de la lame usée des figures 4.26 et 4.27.

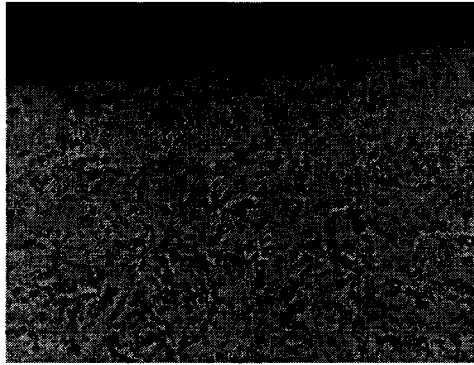


Figure 4.29 : Présence de carbures sur la lame neuve aiguisée

En conclusion, en comparant avec des lames neuves, la microstructure des lames est composée de ferrite, de carbures de martensite au revenu. La présence de la martensite au revenu confirme l'hypothèse du revenu induit par échauffement du matériau lors du frottement. La décarburation observée dans la zone de la pointe confirme le ramollissement du matériau au niveau de la pointe qui favorise sa déformation plastique (figure 4.30) et donc la chute de la dureté observée. Ces résultats de variations microstructurales sont d'importance capitale pour expliquer les phénomènes d'usure observés au niveau de la pointe de la lame et confirme leur impact sur la variation de la qualité obtenue durant le procédé de crêpage du papier.

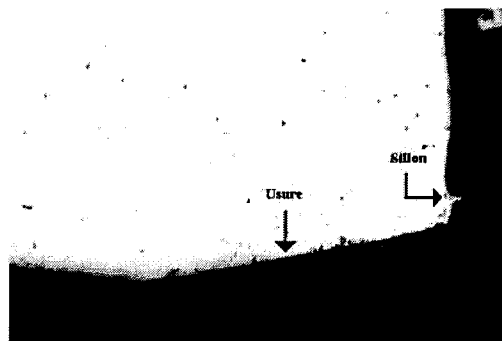


Figure 4.30 : Mise en évidence de l'apparition de déformation plastique au niveau de la pointe de la lame

4.2.4 Tests sur la largeur des lames selon la position longitudinale

Suite aux informations sur la fabrication des lames fournies par les représentants de la compagnie Bonetti, fournisseur des lames de crêpage de la compagnie de papier, une étude sur la cambrure des lames a été effectuée. La compagnie Bonetti reçoit des bobines d'acier qui sont coupées à la bonne épaisseur et enroulées. Ces rouleaux sont ensuite surfacés puis biseautés pour les lames à degré. Toutes les opérations se déroulent en Europe jusqu'à là. Les bobines sont ensuite envoyées à St-Louis-de-France (Trois-Rivières) où elles sont coupées en lames de la bonne longueur. Un contrôle de la qualité est effectué à cette étape pour s'assurer que les lames ne sont pas cambrées ni ondulées. Si c'est le cas, elles sont rectifiées.

Une lame cambrée, une fois rectifiée, est adéquate pour la première utilisation, mais en raison de son échauffement en utilisation, la cambrure peut revenir, ce phénomène est reliée à la variation volumique induite par la transformation martensitique de la microstructure. Lorsque c'est le cas, le procédé de meulage ne tient pas compte de cela, de sorte que le côté du biseau est bien droit, mais le côté qui s'appuie dans le porte-lame est en forme de « sourire ». Lorsqu'une telle lame est appliquée, la pression fait en sorte qu'elle s'appuie sur le fond du porte-lame et que la partie en contact avec le yankee est inégale (sourire). Ce phénomène peut avoir un impact important sur l'opération de crêpage.

Partant de ce fait, les différentes lames utilisées lors des tests effectués durant les années 2006 et 2007 ont fait l'objet d'une analyse dimensionnelle. Cette étude consistait à mesurer la largeur des lames à l'aide d'un pied à coulisse. Cette largeur était mesurée à tous les 10 cm ce qui donnait en tout 31 mesures pour chaque lame. Les figures qui suivent présentent les résultats obtenus pour la largeur des différentes lames. On peut remarquer que la largeur des lames est généralement plus grande au milieu qu'aux extrémités comme en fait foi les figures 4.31 à 4.33. Ce renseignement peut être très utile pour savoir de quelle façon les lames sont cambrées.

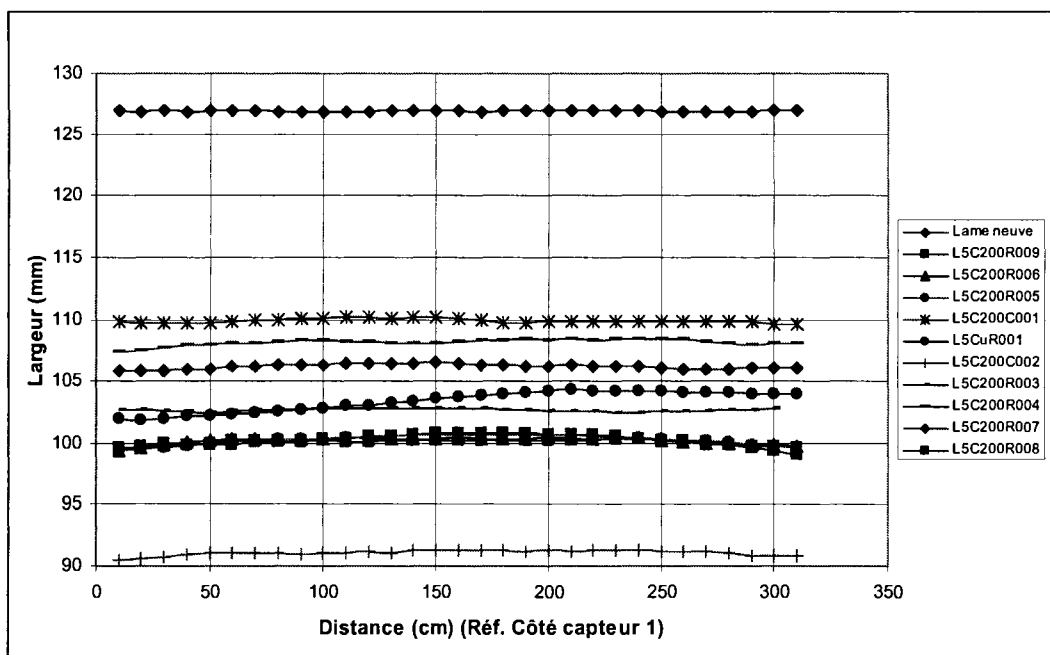


Figure 4.31 : Largeur des lames en fonction de la distance longitudinale de la lame (réf. côté capteur 1)

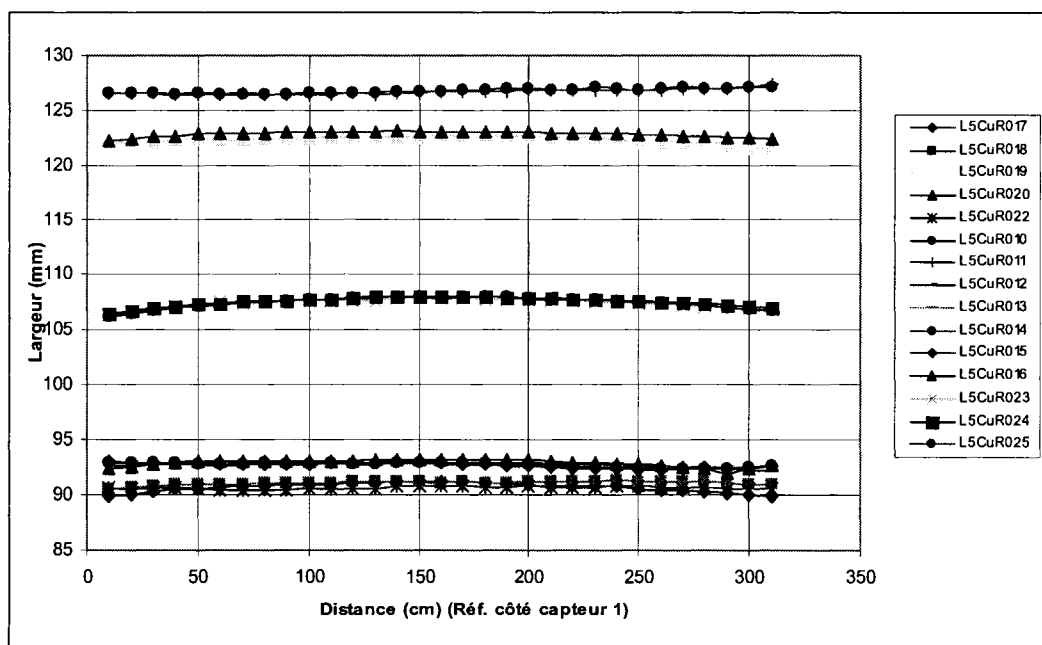


Figure 4.32 : Largeur des lames en fonction de la distance longitudinale de la lame (réf. côté capteur 1)

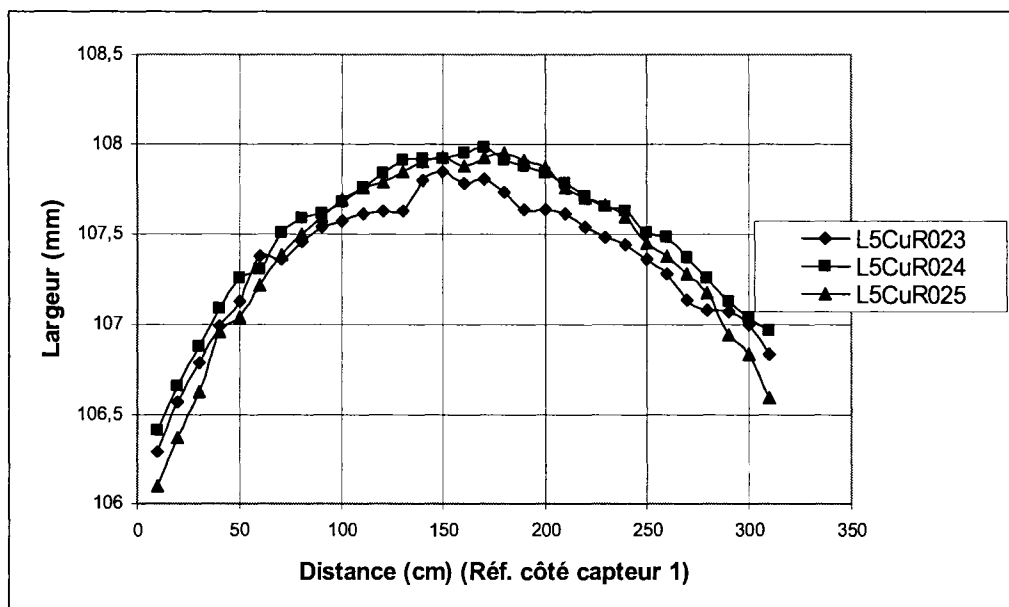


Figure 4.33 : Largeur de certaines lames en fonction de la distance longitudinale de la lame (réf. côté capteur 1)

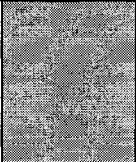
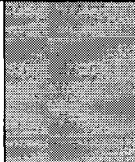
Ces tests montrent qu'il existe des différences de largeur de lame aussi grande que 2,39 mm entre la position la plus large et la position la moins large pour une lame. La moyenne de différences de largeur des lames testées se situe quant à elle à 1,04 mm. Ces dimensions peuvent sembler petites à première vue mais étant donné la sensibilité du procédé, elles sont loin d'être négligeables.

Le fait que les lames soient plus larges au centre qu'aux extrémités fait en sorte que celles-ci ont un meilleur contact avec le yankee au milieu. Ce phénomène entraîne nécessairement une différence dans la qualité du crêpage du papier entre ces deux positions. Il sera intéressant de mettre en relation cette constatation avec la qualité du papier produit le long de la lame. Cet exercice sera fait plus tard dans ce rapport. Les données relatives à ces tests sont présentées à l'Annexe II.

4.2.5 Tests sur la mesure des largeurs des zones usées des lames à partir du MEB

Une étude sur l'évolution de la largeur de la zone d'usure le long des lames a été menée. Pour cela une série d'échantillons a été prélevée sur plusieurs lames à différentes distances à partir du côté « capteur 1 », comme le montre le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Répartition des échantillons

Lames Étudiées	Distance des échantillons / côté "capteur 1" (cm)				
L5C200R003 (90 min)	60 cm		155 cm		255 cm
L5C200R004 (50 min)					
L5C200R007 (5 min)					
L5C200R008 (21 min)					
L5CuRO19 (232 min)					
L5CuRO22 (172 min)	60 cm	110 cm	155 cm	200 cm	255 cm

Il est important de noter que les distances (en cm) indiquées dans le tableau sont celles du centre des zones dans lesquelles ont été découpés les échantillons par rapport au bord de la lame (côté capteur 1) et non les positions précises des échantillons. Cela est plus visible sur la figure 4.34, ci-dessous :

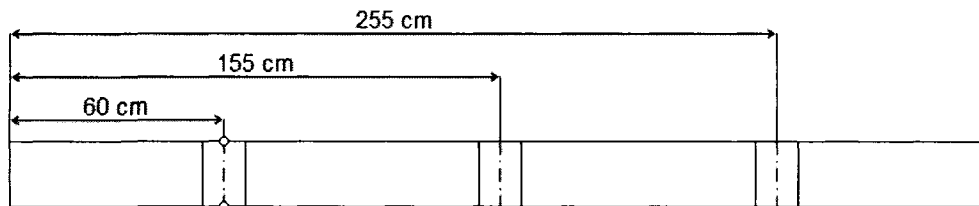


Figure 4.34 : Localisation des échantillons sur la lame

Dans chacune de ces zones, une bande d'environ 1 cm de largeur a été découpée et divisée en trois échantillons, là encore d'un cm de côté. Ces différents échantillons ont ensuite été analysés au microscope électronique à balayage (MEB) afin de mesurer avec précision la largeur de la zone d'usure (μm).

La figure 4.35 présente l'évolution de la largeur de la zone d'usure le long des lames étudiées. Il est intéressant de remarquer que la largeur de la zone d'usure augmente lorsque l'on se rapproche du centre de la lame. Cette observation est d'autant plus vraie pour les lames ayant un temps d'utilisation élevé. La figure 4.36 montre quant à elle l'évolution de la largeur de la zone d'usure en fonction du temps.

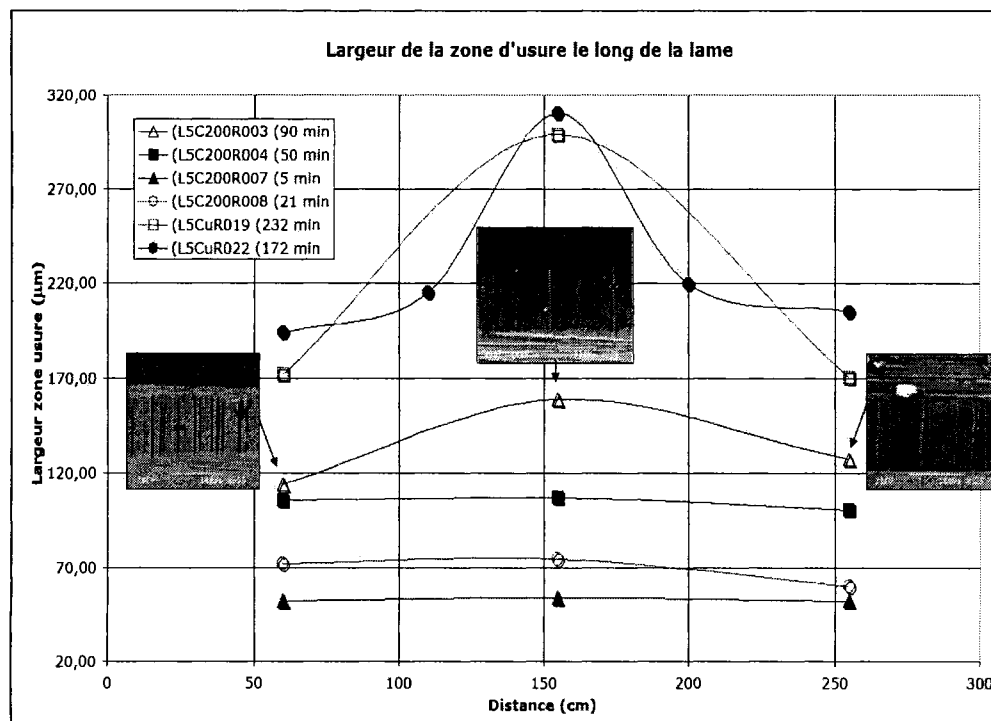


Figure 4.35 : Évolution de la largeur de la zone d'usure le long des lames

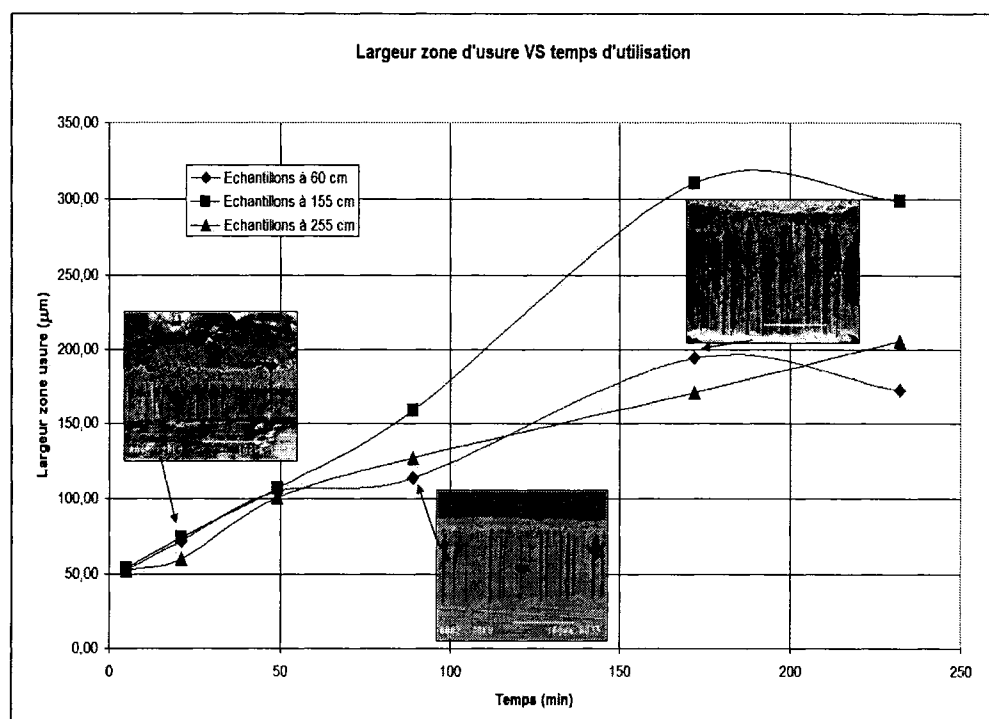


Figure 4.36 : Largeur de la zone d'usure en fonction du temps d'utilisation

Il est donc intéressant d'étudier maintenant l'évolution de la largeur de la zone d'usure en fonction du temps d'utilisation des lames. Comme le montre la tendance des courbes de la figure 4.36, plus le temps d'utilisation augmente, plus l'écart entre la largeur de la zone d'usure des extrémités et celle du centre est important. De plus, même si cela peut paraître assez évident, la figure 4.36 permet de vérifier que la largeur de la zone d'usure augmente bien en fonction du temps d'utilisation.

Cette analyse permet de conclure que la largeur de la zone d'usure n'est pas constante le long des lames. Elle est plus importante au centre qu'aux extrémités et cet écart s'accroît avec le temps d'utilisation. Il sera intéressant de mettre en relation cette observation avec la cambrure des lames. Ce qui sera réalisé plus tard dans ce rapport.

4.2.6 Variation de l'aire de la surface déformée plastiquement en bout de lame

Ce dernier travail a consisté à mesurer sur chacune des images prises au MEB, l'aire de la zone déformée plastiquement lors de l'usure adhésive (figure 4.37). Pour ce faire, le logiciel de traitement d'image « Image J » a été utilisé.

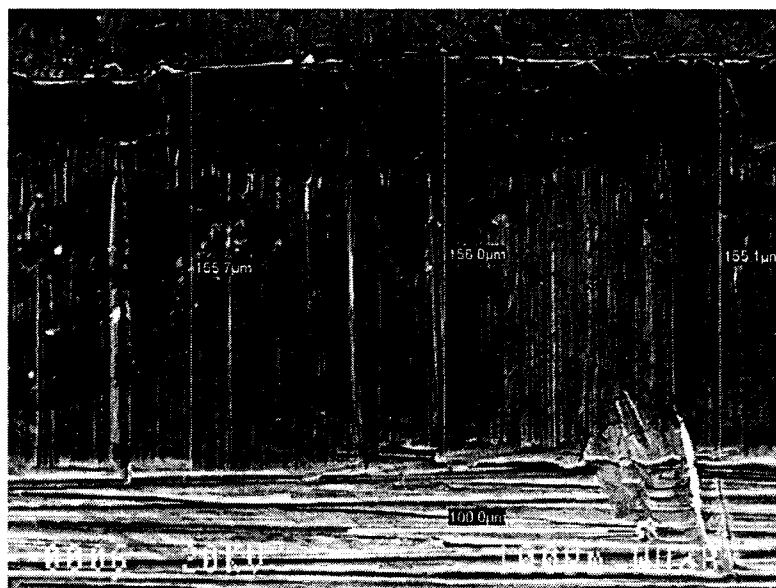


Figure 4.37 : Mesure de l'aire de la zone déformée plastiquement

Une fois toutes les aires mesurées, il a donc été possible de tracer pour chaque lame, l'évolution de l'aire de la surface déformée en fonction de la position de l'échantillon sur la lame. Ces résultats sont présentés sur la figure 4.38.

Il est à noter que l'unité n'a pas été relevée, l'important étant ici la comparaison entre les aires suivant leurs positions le long de la lame.

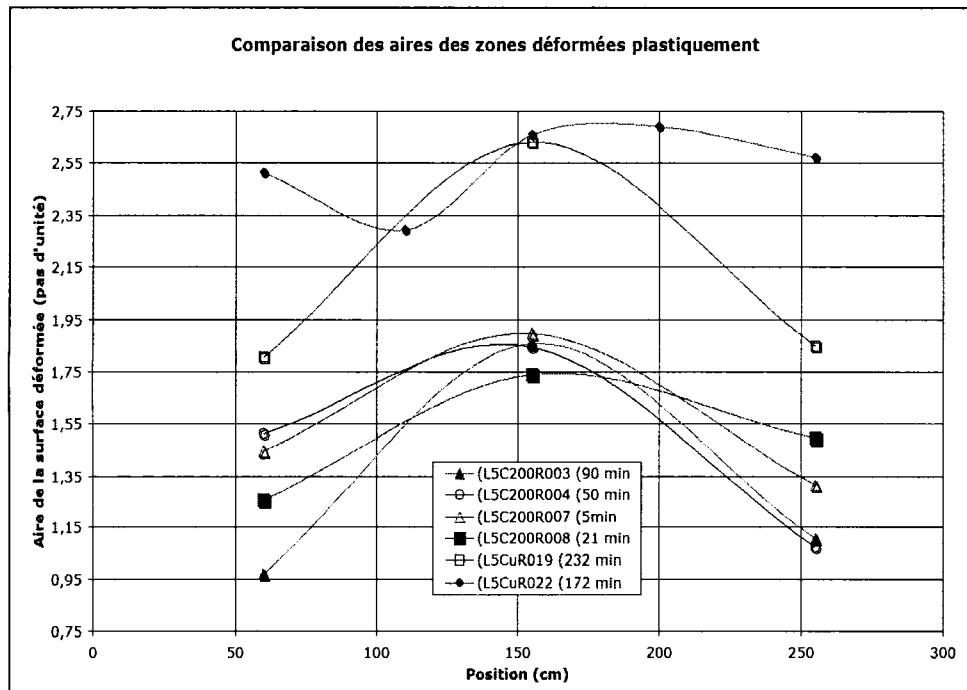


Figure 4.38 : Évolution de l'aire de la zone déformée plastiquement le long de la lame

Comme on peut l'observer sur la figure 4.38, l'aire de la zone déformée plastiquement est plus grande au centre de la lame qu'aux extrémités. L'évolution de cette surface suit donc la même tendance que l'évolution de la largeur de la zone d'usure le long de la lame (figure 4.35).

En conclusion, l'hypothèse d'une pression plus importante appliquée au centre de la lame du fait de la variation dimensionnelle le long de cette dernière serait donc encore une fois vérifiée dans cette partie. En effet, l'aire de la zone la plus en contact avec le yankee est plus grande au centre qu'aux extrémités. Il est à noter que les courbes de comparaison entre l'allure de l'évolution de l'aire et la variation dimensionnelle de la lame n'ont pas été tracées ici, car elles n'apporteraient pas de nouveaux éléments.

La figure 4.39 présente l'évolution de l'aire de la zone déformée plastiquement en fonction du temps d'utilisation de la lame. Il est possible de remarquer que pour un court temps d'utilisation, jusqu'à environ 50 minutes, l'écart entre l'aire mesurée au centre de la lame et celle mesurée à ses extrémités est assez faible. Ensuite, plus le temps d'utilisation augmente, plus cet écart se creuse, jusqu'à atteindre son maximum aux alentours de 90 minutes. A partir de ce moment, l'aire de la zone déformée augmente, mais l'écart décroît, jusqu'au voisinage de 175 minutes d'utilisation. Enfin, la dernière phase ne semble pas correcte. En effet, l'aire de la zone déformée diminue et l'écart se remet à augmenter. Cette « erreur » pourrait être expliquée par le manque de précision des mesures d'aire et leurs nombre en trop faible quantité. Il faut donc ici plus apprécier la tendance générale.

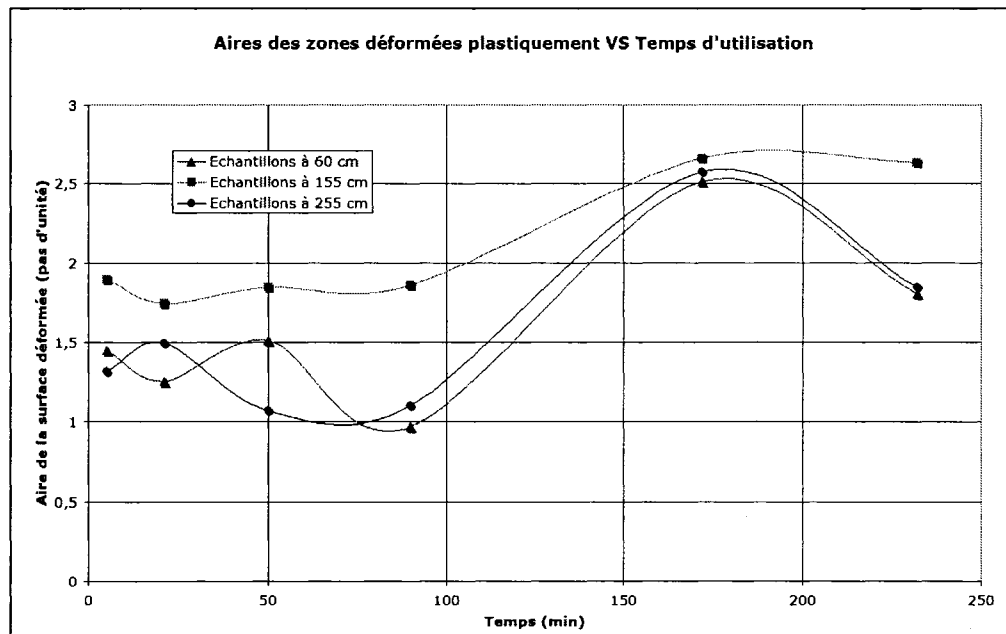


Figure 4.39 : Évolution de l'aire de la zone déformée plastiquement en fonction du temps d'utilisation

Tout cela est encore plus visible sur la figure 4.40 qui montre l'évolution en fonction du temps d'utilisation de la lame, de l'écart (en %) entre l'aire de la zone déformée plastiquement mesurée au centre de la lame et celle mesurée à ses extrémités. La courbe noire (lissée) représente la tendance générale. On peut observer d'après cette courbe que l'écart tend à se stabiliser pour des temps d'utilisation assez longs.

Cette tendance pourrait être expliquée d'après plusieurs hypothèses. Au bout d'un temps assez court, l'usure n'a pas beaucoup évolué et l'écart entre l'aire de la zone déformée au centre et celle aux extrémités n'est pas encore très marqué. Lorsque le temps d'utilisation atteint environ 50 minutes, la zone de déformation plastique commence à s'étendre, et ce, d'autant plus au centre de la lame, du fait de la « surpression » déjà évoquée précédemment. On rappelle que le temps de 50 minutes coïncide avec le temps d'extraction du deuxième rouleau.

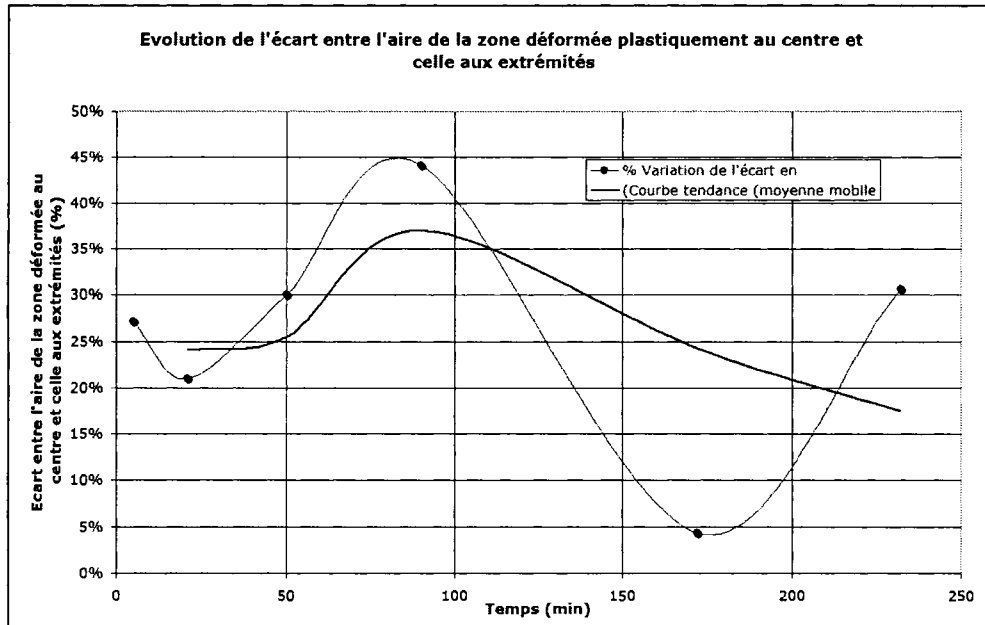


Figure 4.40 : Évolution de l'écart (en %) entre l'aire de la zone déformée au centre de la lame et celle des extrémités

Cette phase correspondrait donc à l'accroissement de l'écart sur la figure 4.39. Au fur et à mesure que le temps augmente, la perte de matière augmente elle aussi et la pression diminue donc au centre de la lame. Elle tend à se rapprocher de celle des extrémités. Ce qui coïnciderait ici avec la décroissance de l'écart, jusqu'à sa stabilisation pour des temps d'utilisations assez longs (aux alentours de 250 ~ 300 minutes).

L'étude de l'aire de la zone déformée plastiquement va donc dans le même sens que celle de la largeur de la zone d'usure, avec un accroissement au centre de la lame. Elle apporte aussi de nouvelles hypothèses quant à la variation de la pression sur les différentes parties de la lame en fonction du temps.

4.2.7 Mesure de la perte de matière des lames par microscopie optique

Pour connaître l'évolution de l'usure en fonction du temps, plusieurs méthodes étaient envisageables ; en mesurant la perte de cote, la perte de masse en fonction du temps ou encore en calculant le coefficient d'usure. C'est la première méthode qui a été choisie puisqu'elle semblait à la fois précise et facile à mettre en place. L'objectif visé est de corréler l'évolution de l'usure de la lame avec les paramètres directement associés au papier. Pour mesurer cette perte de matière, les échantillons utilisés sont ceux qui ont été préparés pour le test de microdureté. Le principe de la procédure est de visualiser au microscope la zone d'usure de la lame, d'enregistrer l'image sur ordinateur puis d'évaluer l'aire de la matière perdue. Cette zone est montrée sur la figure 4.41.

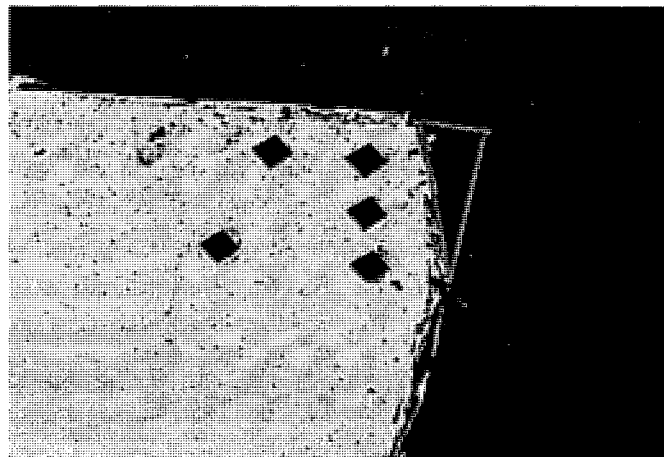


Figure 4.41 : Mesure de la perte de matière

Les lames choisies pour faire ce test ont été prises afin de balayer un temps d'usure assez large. La lame la moins usée a servi pendant 5 minutes tandis que la plus usée a été utilisée pendant 90 minutes. Le tableau 4.5 expose les résultats obtenus.

Tableau 4.5 : Résultats de la perte de matière due à l'usure

Temps d'utilisation de la lame (min)	Surface usée (μm^2)	Largeur de la zone d'usure (μm)
5	1076	77
21	7133	180
50	16 080	256
90	21 955	352

Ces valeurs ont ensuite été mises sur un graphique afin de visualiser la tendance suivie (figure 4.42).

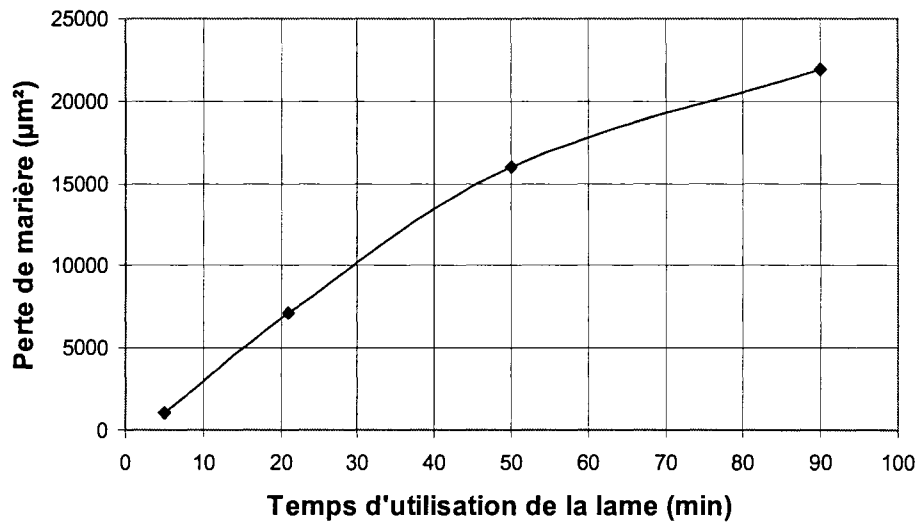


Figure 4.42 : Évolution de la perte de matière en fonction du temps

La perte de matière évolue de manière linéaire pendant les 50 premières minutes d'utilisation de la lame, puis un changement de pente est observé ; elle augmente toujours mais d'une façon moins sévère à la fin de la vie de la lame comparativement au début de la durée de vie de la lame. En conclusion, durant les 50 premières minutes la lame subit une perte de matière avec une vitesse élevée, pente de la courbe, cette perte est favorisée par les frottements initiaux et les transformations microstructurales déjà observées précédemment, qui expliquent la chute de dureté au niveau de la pointe de la lame. Après 50 minutes d'utilisation, la perte de matière subit une pente moins accentuée, donc au taux de perte plus faible, car les phénomènes de déformation plastique induisent un écrouissage qui a pour conséquence une augmentation légère de dureté de la pointe de la lame. Cette augmentation de la dureté a un impact sur la qualité du papier car on observe une augmentation des valeurs du bouffant après l'extraction du deuxième rouleau, soit après 50 minutes. Vers la fin du procédé, l'aire de contact augmente à cause de la persistance de la déformation plastique de la pointe, ce qui a pour conséquence la variation de l'angle de crêpage et par surcroît amène le décrochage de la lame qui induit l'apparition visuelle des stries sur le yankee.

4.2.8 Microscope électronique à balayage (MEB)

i. Objectif visé et procédure expérimentale

Afin de voir les mécanismes d'usure qui prévalent dans la zone de frottement de la lame, le microscope électronique à balayage a été utilisé. Cet outil permet de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Les micrographies recueillies donnent l'aspect de la zone d'usure ainsi que les dimensions de celle-ci. Les échantillons qui ont été inspectés avec cet instrument sont des morceaux de la pointe usée des lames L5CR004 à 100 cm, L5CR007 à 100 cm, L5CR008 à 100 cm et L5CR003 à 100 cm, 150 cm et 250 cm. Ces différents spécimens ont été choisis pour leurs temps d'exposition différents à l'usure ainsi que pour leurs différentes duretés pour un même temps d'exposition. Ainsi, tous les échantillons pris à 100 cm servent à évaluer et à quantifier l'usure de la lame en fonction du temps tandis que les échantillons de la lame L5CR003 pris à différentes distances (100, 150 et 250 cm) servent à évaluer l'état de la pointe usée de la lame pour différentes valeurs de dureté et ce, pour un même temps d'exposition à l'usure. Le tableau 4.6 montre les spécifications pour chacun de ces échantillons.

Tableau 4.6 : Spécifications des échantillons observés au MEB

Numéro de la lame	Distance (cm)	Temps d'exposition à l'usure (min)	Dureté moyenne (HRC)	But du test
L5CR004	100	50	40,62	- Usure vs temps
L5CR007	100	5	44,1	- Usure vs temps
L5CR008	100	21	36,5	- Usure vs temps
L5CR003	100	90	33,7	- Usure vs temps - Usure vs dureté (même temps)
L5CR003	150	90	42,73	- Usure vs dureté (même temps)
L5CR003	250	90	40,15	- Usure vs dureté (même temps)

Ces échantillons ont tout d'abord été coupés à même les lames grâce à une scie radiale refroidie à l'eau. Une attention toute particulière a été portée à la découpe des

échantillons afin d'éviter un échauffement de ceux-ci. Un tel phénomène aurait eu pour effet de modifier la microstructure et de nuire ainsi à l'étude de la métallurgie de la lame. Une fois ces échantillons découpés, ils ont été nettoyés et apposés sur des supports à l'aide d'un adhésif fait de carbone. Ensuite, ils ont été placés dans la chambre sous vide pour des fins d'analyse avec le MEB.

ii. Résultats obtenus et analyse

Pour chacun des échantillons, trois photos de la zone d'usure ont été prises par spécimen avec un agrandissement de 370X. La zone d'usure est située dans le milieu de la photo à l'horizontale. Les figures 4.43 à 4.46 montrent ces différentes micrographies pour les échantillons pris à 100 cm.

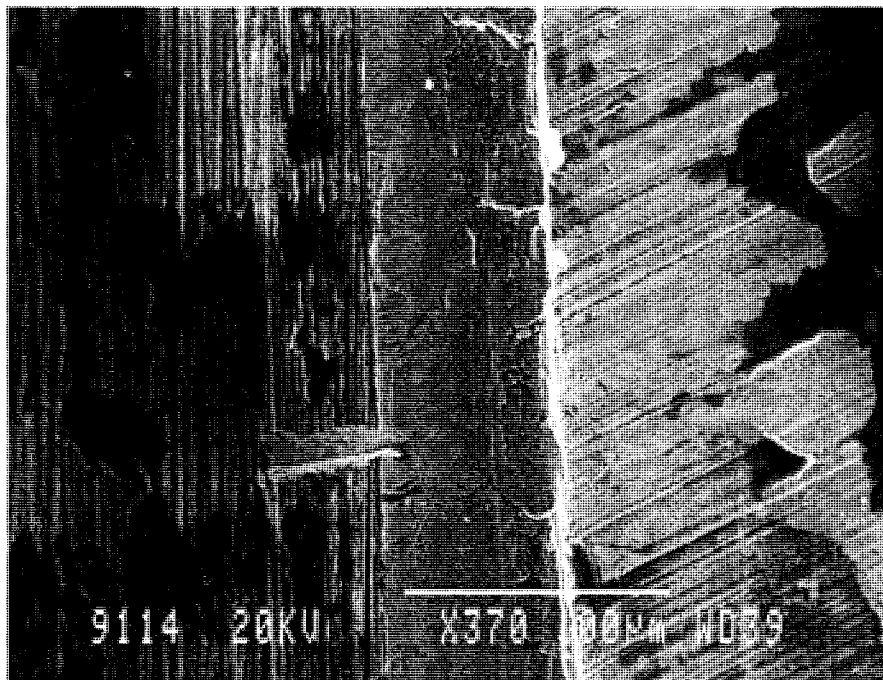


Figure 4.43 : L5CR007_100 cm (5 min)



Figure 4.44 : L5CR008_100 cm (21 min)

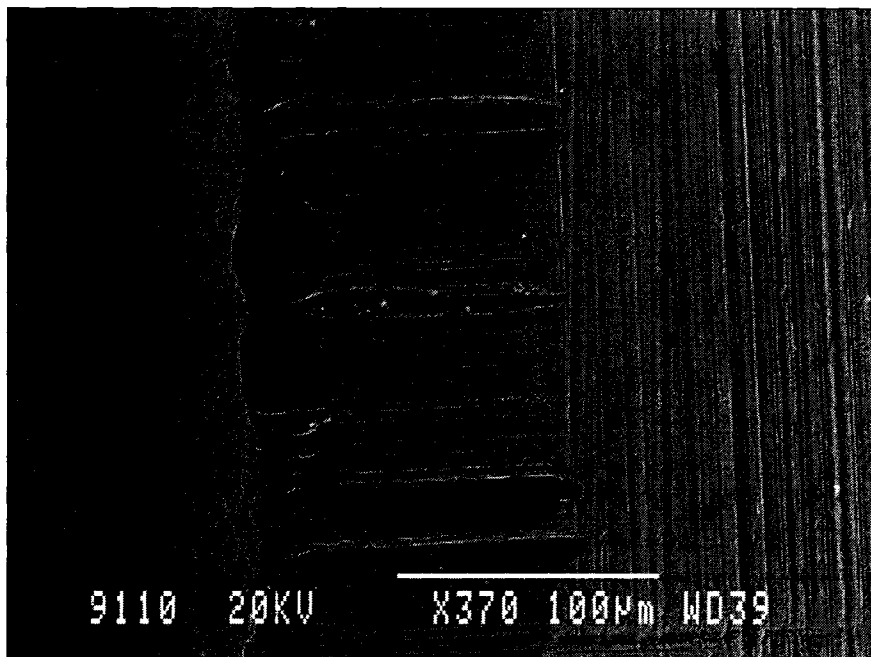


Figure 4.45 : L5CR004_100 cm (50 min)

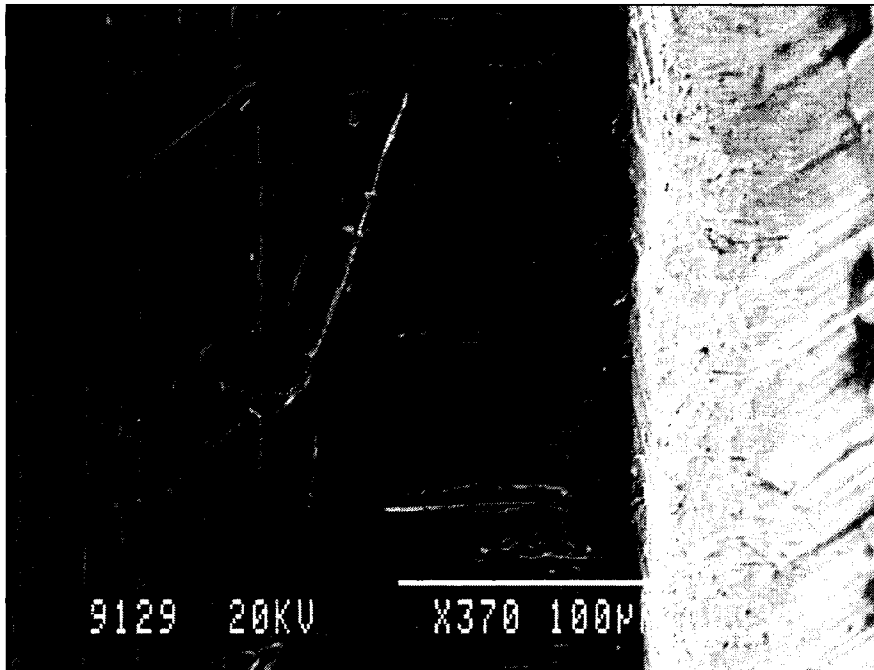


Figure 4.46 : L5CR003_100 cm (90 min)

Tel qu'avancé précédemment, On peut remarquer facilement sur ces micrographies que la largeur de la zone usée (au milieu des micrographies) augmente avec le temps d'exposition à l'usure. Ces différentes largeurs ont été mesurées auparavant et les valeurs ont été consignées dans un graphique en fonction du temps. Les données sur la largeur ont montrées une tendance d'augmentation très linéaire en fonction du temps comme le montre la figure 4.47. Étant donné que la pression linéaire est supposée constante sur toute la durée de vie d'une lame (33 pli pour la compagnie de papier) et que la surface de contact entre la lame et le yankee augmente due à l'augmentation de largeur de la zone d'usure, il s'en suit une diminution obligatoire de la pression surfacique exercée par la lame sur le yankee. Cette diminution de pression engendre automatiquement des changements dans le mécanisme de crêpage du papier, ce qui a pour effet de faire varier la qualité de celui-ci. L'augmentation de la largeur de contact et la diminution de pression qui en résulte sont illustrées sur la figure 4.48 en fonction du temps.

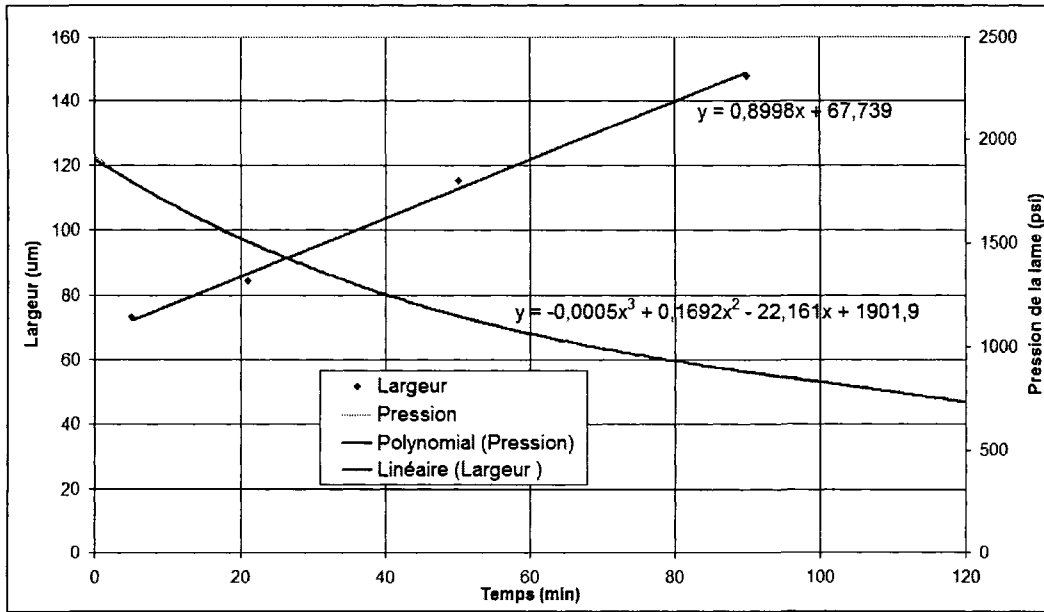


Figure 4.47 : Évolution de la largeur de la zone d'usure et de la pression exercée par la lame sur le yankee en fonction du temps

La courbe de la largeur de la zone d'usure en fonction du temps est obtenue à l'aide de l'élaboration d'une courbe de tendance grâce aux quatre largeurs mesurées sur chacune des quatre lames à l'étude. Ces largeurs varient de 73 microns (5 minutes) à 148 microns (90 minutes). La courbe de pression est quant à elle obtenue grâce à un calcul qui met en relation l'équation de la largeur de la zone d'usure de la lame en fonction du temps ($y = 0,8998x + 67,739$), la longueur de la lame qui touche au yankee (301,5 cm), ce qui donne l'aire de la zone d'usure en fonction du temps, et la pression linéaire exercée par la lame sur celui-ci (33 pli – livres par pouce linéaire). Cette pression varierait entre 1918 et 740 psi sur 120 minutes ce qui représente une très forte baisse de pression. Cependant, il est connu que la partie de la lame qui est en contact avec le yankee n'est pas totalement uniforme et que seulement une fraction de l'aire totale de cette partie exerce réellement une pression sur le yankee. Ainsi, les pressions surfaciques réelles exercées sur le yankee doivent être plus grande que celles illustrées dans le modèle mentionné plus haut. Néanmoins, il reste que cette pression serait diminuée sensiblement de la même façon malgré la non homogénéité du contact lame-yankee. Dans la littérature, on parle d'une pression linéaire d'environ 1500 N/m à 3500 N/m. Pour l'entreprise en question, la pression linéaire varie entre 33 pli et 52 pli typiquement, ce qui correspond à une pression qui est entre 5785 et 9115 N/m. Ces valeurs sont relativement plus grandes que celles données par la littérature mais restent tout de même dans un ordre de grandeur semblable.

En ce qui concerne les mécanismes d'usure qui prévalent dans la pointe de la lame en fonction du temps d'exposition, les observations permettent de conclure que l'usure a l'effet d'un polissage qui peut être observé sur les figures 4.48 et 4.49 où il est possible de voir lignes d'aiguisage dans la section usée. L'usure évolue donc progressivement au cours de la vie de la lame. Ce phénomène est appelé rodage.

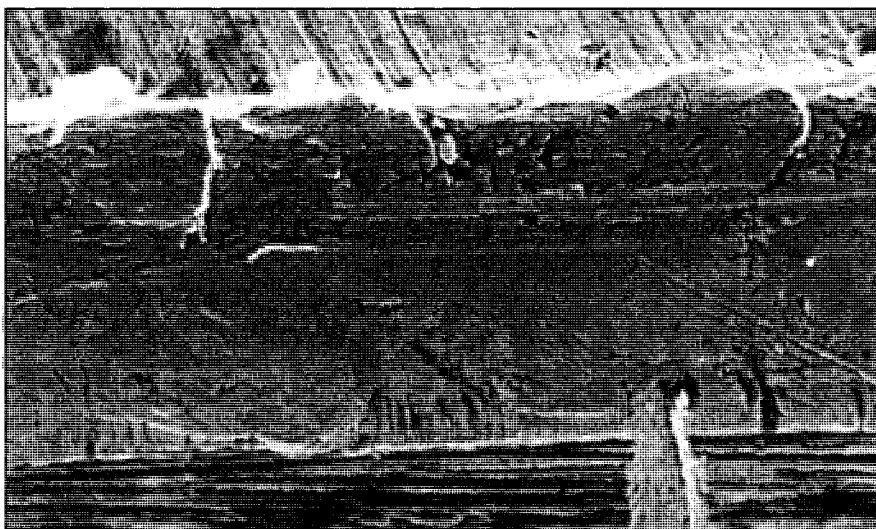


Figure 4. 48 : Faciès d'usure de la lame L5CR007 (5 min) où l'on voit très peu d'usure adhésive

Au bout de 21 minutes, deux phénomènes apparaissent. L'un d'eux est le début de la formation d'une zone de déformation plastique du côté où frappe le papier et sur la pointe de la lame. L'autre, est la formation d'une petite zone d'usure en forme de biseau du côté opposé où frappe le papier. Ces deux phénomènes sont illustrés sur la figure 4.49 qui représente la lame L5CR008 (21 min).

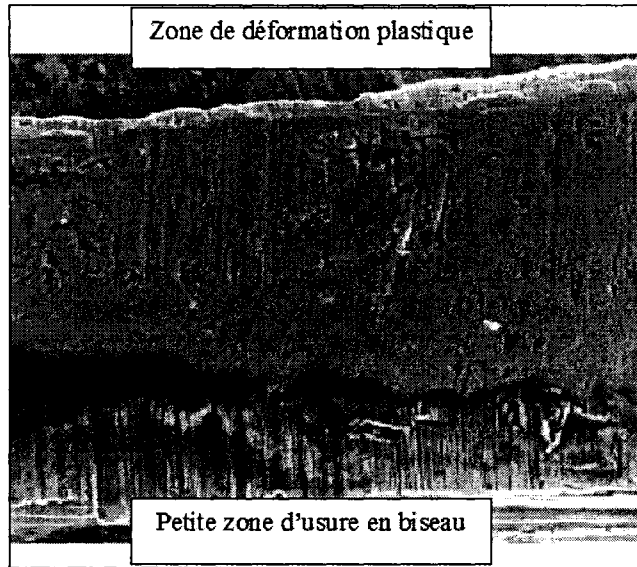


Figure 4.49 : Faciès d'usure de la lame L5CR008 (21 min) où l'on voit une zone de déformation plastique et une petite zone d'usure en biseau

Pour ce qui est des échantillons recueillis après 50 et 90 minutes d'utilisation, ils montrent tous deux les mêmes mécanismes d'usure mais seulement à des degrés différents. Les deux montrent des zones d'arrachement de matière sur toute la largeur de la zone usée, ce qui est probablement dû à de l'usure adhésive. Ceci donne un fini de surface d'usure beaucoup moins lisse que pour les deux autres échantillons. La zone usée pour la lame L5CR004 (50 min) est illustrée sur la figure 4.50.

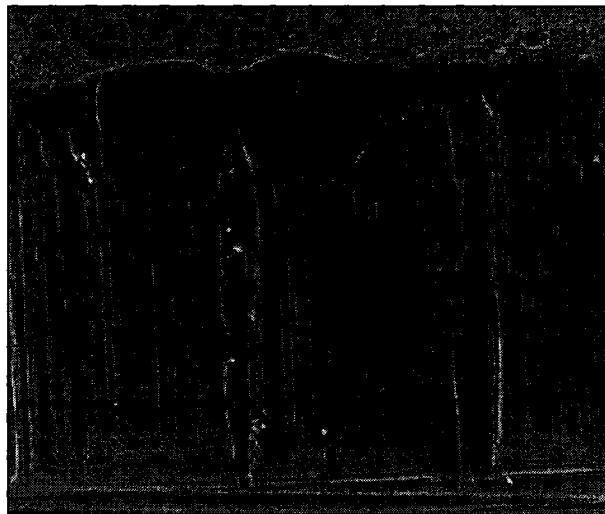


Figure 4.50 : Faciès d'usure de la lame L5CR004 (50 min) où l'on voit des zones d'arrachement et des signes d'usure abrasive

Sur cette dernière figure, il est possible d'observer les signes d'usure adhésive, d'usure abrasive, d'usure par érosion et de déformation plastique. À ce stade, toutes les formes d'usure sont réunies car la pièce est sollicitée de plusieurs façons et ce depuis un temps assez considérable.

En conclusion, immédiatement après l'aiguisage, la surface de contact lame-yankee est petite et les pressions superficielles élevées, ce qui favorise l'usure adhésive et abrasive. Par la suite, la perte de matière et la déformation plastique augmentent la surface de contact ce qui a pour effet de diminuer le taux d'usure et de favoriser l'usure corrosive. La force appliquée sur la lame est toujours la même et l'aire de contact évolue avec le temps, donc la pression varie en fonction du temps. Ces mécanismes tribologiques ont une influence importante sur la formation des crêpes et sur le procédé du crêpage.

4.2.9 Mesure du profil d'usure de la lame au profilomètre laser

Afin d'évaluer le profil d'usure des lames de crêpage, un profilomètre laser a été utilisé. Cet outil permet de mesurer la position exacte de points dans l'espace à l'aide d'un rayon Laser qui balaye la surface mesurée. Ainsi, un échantillon de faible dimension de la lame L5CR019 a été scannée sur une longueur de 2,4 mm près de la zone en frottement afin d'analyser le profil de la surface de la lame après usure. L'appareil fonctionne en positionnant exactement des points dans l'espace à partir d'une référence fixe. C'est un faisceau laser d'environ 2 cm de large qui est utilisé pour scanner la pièce. En exploitant la réflexion de la lumière, le système est capable d'identifier avec une grande précision la position exacte de points sur la pièce. Pour parvenir à obtenir un profil précis, il faut passer plusieurs fois sur la pièce afin que plus de points soient enregistrés. La figure 4.51 montre le profil obtenu sur l'échantillon testé.

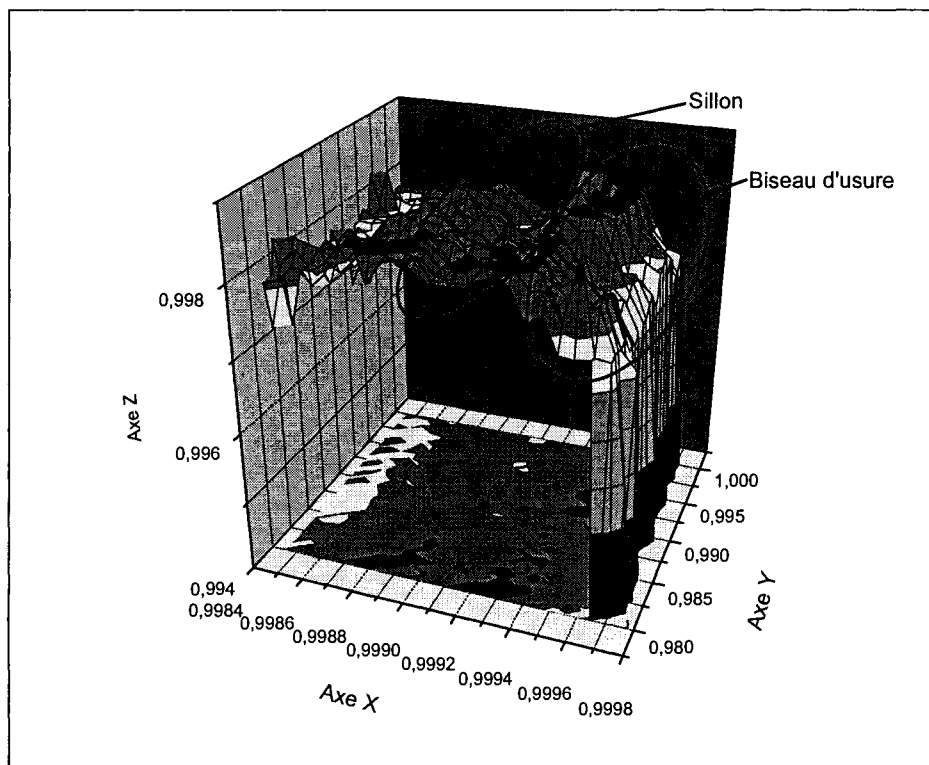


Figure 4.51 : Résultats des tests au profilomètre laser montrant 2 zones distinctes de l'usure : le biseau d'usure par frottement et le sillon

L'axe des x représente la largeur de l'échantillon, l'axe y sa longueur et enfin l'axe z représente la profondeur au niveau de la surface balayée. Les variations de surface observées sur la courbe représentent la rugosité de celle-ci. La surface de l'échantillon n'est pas lisse, mais présente deux zones distinctes d'usure. Premièrement, on remarque le biseau d'usure créé par le frottement de la lame contre le yankee caractérisé par une variation importante, crête, dans la surface de la courbe. Cette variation représente l'émoussement déjà observé auparavant résultant de la déformation plastique de la lame.

La deuxième zone représente le sillon d'usure où le papier vient frapper contre la lame. Cette zone est non seulement créée par le papier mais aussi par la déformation plastique que subie la lame à cause des fortes contraintes qui lui sont appliquées. Il est facile de distinguer cette dépression sur la figure 4.52, elle se situe entre 0,9991 et 0,9992 sur l'axe des x. Grâce à cette analyse, on peut non seulement observer la présence du sillon mais aussi en mesurer sa profondeur, mesure qui était impossible à réaliser par observation microscopique. Il est clair que l'apparition de ces zones de déformations affecte le niveau de surface de la pointe de lame et par conséquent l'angle de crêpage des lames.

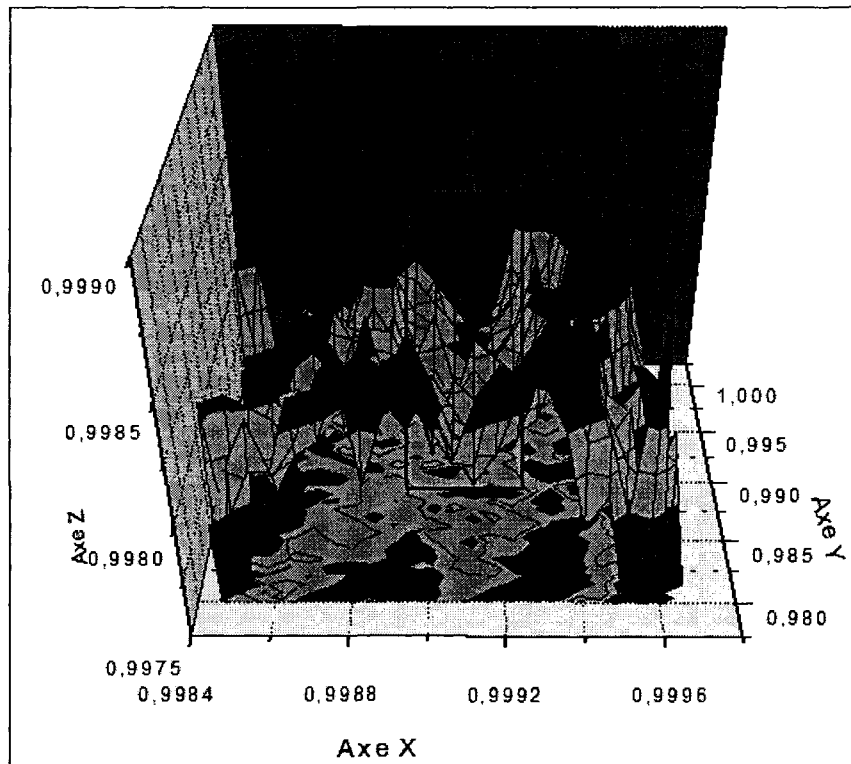


Figure 4.52 : Représentation du sillon d'usure engendré par la déformation plastique et l'impact du papier à partir des tests au profilomètre laser

4.2.10 Analyse du comportement des lames par éléments finis

Cette analyse a pour but de trouver l'effet qu'a le temps d'exposition à l'usure sur les contraintes, les déplacements et les réactions engendrées dans la lame de crêpage. Une étude du procédé de crêpage du papier à l'aide d'une analyse par éléments finis a permis de trouver la réponse à cette question. Le logiciel utilisé pour cette analyse se nomme ADINA, le logiciel de base utilisé par le département de génie civil de l'université de Sherbrooke. Voici les différentes étapes qui ont permis de faire la modélisation de la lame par éléments finis.

i. Géométrie de la lame

Comme il a été mentionné dans l'introduction de ce rapport, la lame de crêpage fait 315 cm de long par 12,3 cm de large (état neuf) par 1,4 mm d'épais. La mention «état neuf» signifie que la lame a cette largeur après le premier aiguisage. Dans l'analyse présentée

ici, l'hypothèse d'une lame à l'état neuf est utilisé. La figure 4.53 présente un plan de la lame de crêpage dans son support.

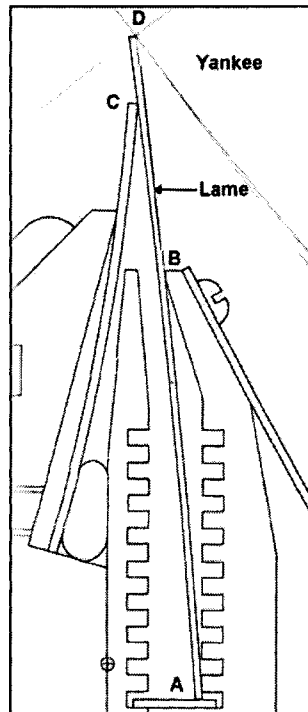


Figure 4.53 : Lame de crêpage dans son support

Sur cette dernière figure, il est possible de voir que la lame est supportée en quatre endroits distincts (endroits notés A, B, C et D sur la figure 4.51). Les positions A, B et C représentent les appuis tandis que la position D représente la zone de frottement avec le yankee. Les appuis B et C sont respectivement placés à des distances de 8 et 11,3 cm de la position A.

La géométrie du bout de la lame est l'un des paramètres les plus importants du procédé de crêpage du papier puisque c'est lui qui détermine en grande partie la qualité du papier. La figure 4.54 présente la géométrie typique du bout d'une lame de crêpage.

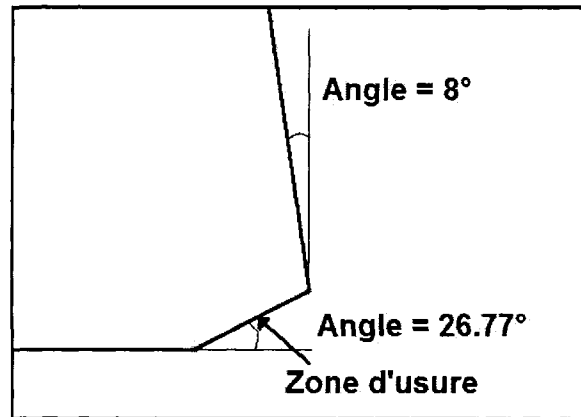


Figure 4.54 : Géométrie du bout de la lame après 6 minutes d'usure

L'angle de 8° est l'angle prédéfini dans la géométrie de la lame tandis que l'angle de $26,77^\circ$ est l'angle formé par l'usure de la lame en contact avec le yankee. Lorsque la lame est à l'état neuf, la partie biseautée n'est pas présente et l'on retrouve alors une arête simple au bout de la lame.

ii. Zone d'usure

Une étude du comportement de la lame soumise à l'usure a permis de constater que la zone de contact entre la lame et le yankee augmente linéairement avec le temps d'exposition à l'usure. Plus la lame frotte longtemps sur le yankee, plus elle perd de la matière. Différentes largeurs de zone d'usure ont été mesurées grâce à des photos prises à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).

La figure 4.55 montre quant à elle le comportement linéaire de l'augmentation de la zone d'usure. Comportement qui a été mis en valeur dans la section 4.2.5.

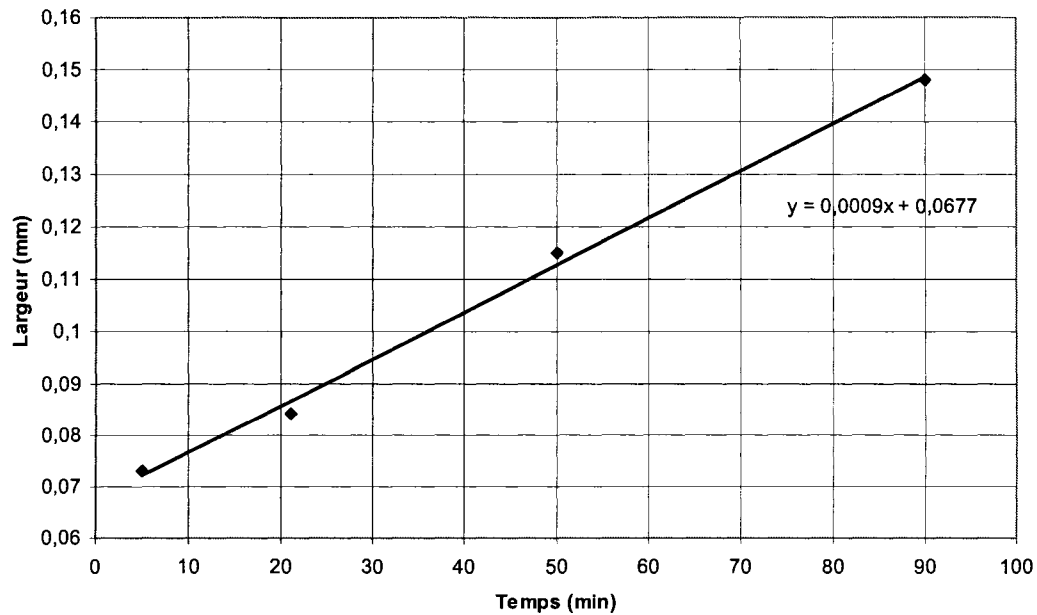


Figure 4.55 : Largeur de la zone d'usure en fonction du temps d'exposition

Ces mesures de largeur sont utilisées afin de déterminer les coordonnées des points à utiliser dans l'analyse par éléments finis.

iii. Pression appliquée

Afin de bien mettre en contact le yankee avec la lame de crêpage, une pression est appliquée par la lame sur le yankee par l'entremise d'un support appelé docteur. La pression est d'abord appliquée dans un cylindre hydraulique pour ensuite être transmis au docteur lui-même. Cette pression est exprimée en PLI (*pound per linear inch*) et varie typiquement entre 35 et 50. Selon la qualité de papier recherchée, il est possible de faire varier cette pression. Cependant, cette pression est gardée constante tout au long du procédé. Ainsi, puisque l'aire de la zone de contact augmente avec le temps d'utilisation de la lame, la pression effective tend à diminuer avec le temps. La figure 4.56 montre à quel endroit et avec quel angle cette pression est exercée.

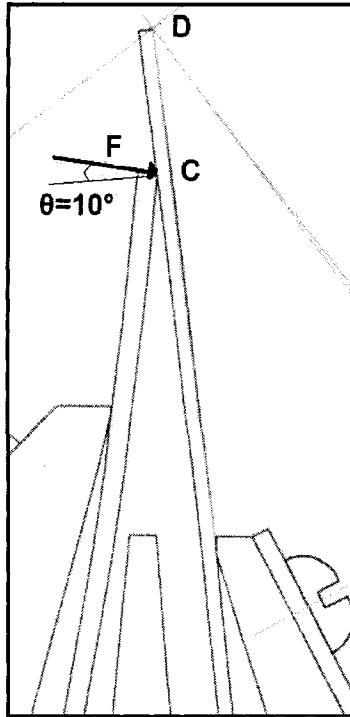


Figure 4.56 : Pression appliquée par la lame sur le yankee

Dans cette analyse, on fait l'hypothèse que la pression est appliquée en totalité par l'entremise du point C avec un angle de 10° avec la normale à la lame.

iv. Charge due au frottement

En plus de la charge due à la pression linéaire, une autre charge s'ajoute étant donné le frottement de la lame sur le yankee. Lorsque 2 surfaces sont en contact et que la force tangentielle devient plus grande que la force de friction entre les 2 surfaces, elles commencent à glisser l'une sur l'autre. Ainsi, en plus de la charge appliquée, il faut aussi considérer la force de friction qui découle du mouvement relatif de la lame sur le yankee. La figure 4.57 montre le lien qui relie la force de frottement à la charge normale appliquée sur la surface en frottement.

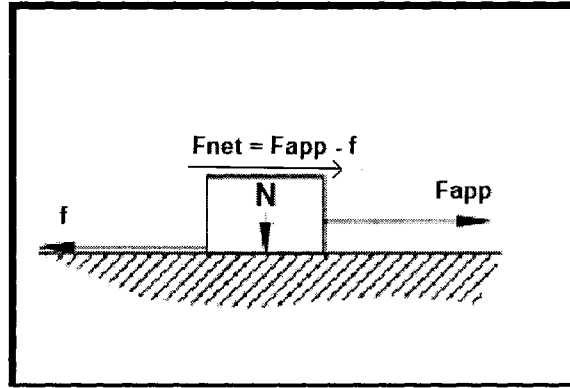


Figure 4.57 : Force de friction engendrée par le frottement

Sur cette figure, N représente la force normale appliquée par la surface supérieure sur la surface inférieure, F_{app} représente la force appliquée tangentielle à la surface, f représente la force de friction et F_{net} la force résultante. La force de friction est alors donnée par l'équation suivante :

$$f = \mu N \quad (4.2)$$

Dans notre cas, la lame est faite d'acier martensitique 420 et le yankee est fait de fonte. Ainsi le coefficient de friction dynamique est $\mu=0,3$ [Logiciel CES, 2007]. La force alors trouvée grâce à l'équation 4.2 doit être ajoutée à la charge appliquée afin de prendre en compte les effets du frottement. Dans le modèle d'éléments finis, ces deux forces seront introduites. Il est à noter que l'effet lubrificateur de l'adhésif a été négligé dans cette étude.

v. *Modèle d'élément finis*

L'analyse par éléments finis du procédé de crêpage a été faite en 7 étapes. Ces étapes correspondent à des temps d'exposition à l'usure de 6, 14, 18, 22, 53, 70 et 89 minutes respectivement. Ces temps représentent un éventail assez significatif pour faire en sorte de bien voir l'effet de l'agrandissement de la zone d'usure sur l'évolution des contraintes, déplacements et réactions qui s'appliquent sur la lame. Le tableau 4.7 présente la correspondance entre le temps d'exposition à l'usure et largeur de la zone d'usure.

Tableau 4.7 : Largeur de la zone d'usure des lames pour différents temps d'exposition à l'usure

Temps d'exposition à l'usure (min)	Largeur de la zone d'usure (mm)
6	0,0731
14	0,0803
18	0,0839
22	0,0875
53	0,1154
70	0,1307
89	0,1478

C'est à partir de ces largeurs que sont déterminées les coordonnées des points qui servent à dessiner la lame dans le logiciel d'éléments finis ADINA.

Étant donné que le comportement de la lame est supposé uniforme sur sa longueur et que l'on est en présence d'un problème de contraintes planes, il est possible de faire l'analyse de la lame de crêpage en 2 dimensions. Les axes y et z ont été choisis et une longueur unitaire de 1 mm est déterminée. Il est à noter que la ligne en A a les degrés de liberté y et z fixés et que le point B a le degré de liberté z fixé. Ainsi, seulement les mouvements selon 3 degrés de liberté sont possibles, soit la rotation autour de x et les translations en y et en z.

Chacune des 7 étapes se fait en 2 temps. En premier lieu, on applique la charge résultant de la pression linéaire au point C puis on fixe en y et en z la zone de frottement en D. On enregistre alors les réactions sur chacun des nœuds de la zone d'usure puis on calcule la force de friction qui résulte de la force normale à cette surface. Dans un deuxième temps, on reprend l'analyse mais cette fois en fixant le point C selon z et en appliquant la charge totale (charge appliquée et force de friction) enregistrée à l'étape précédente sur la zone d'usure. Cette charge est répartie sur chacun des nœuds de la zone d'usure. Il suffit ensuite de calculer les déplacements, contraintes et réactions qui résultent de l'application de cette nouvelle charge. Les figures 4.58 et 4.59 présentent les 2 situations.

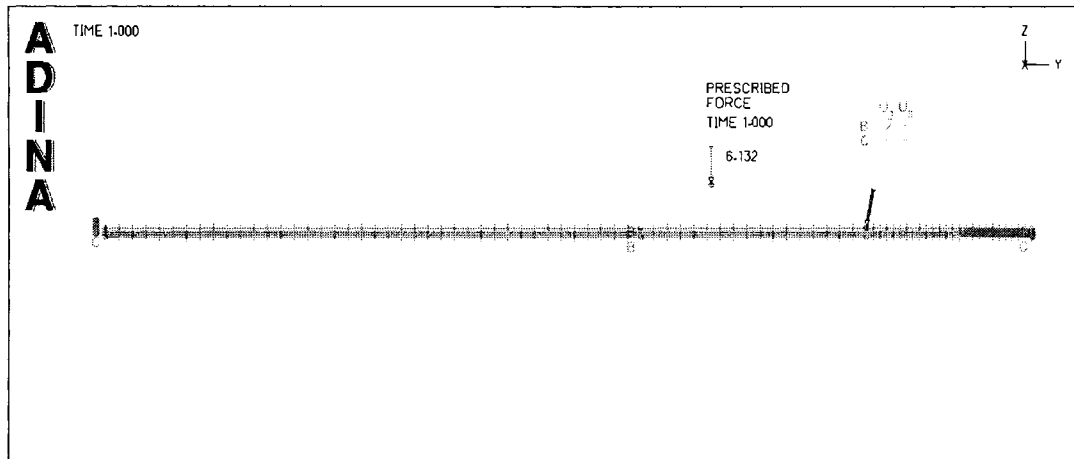


Figure 4.58 : 1^{ère} situation : Charge appliquée au point C et degrés de libertés fixés en y et en z sur la zone d'usure D

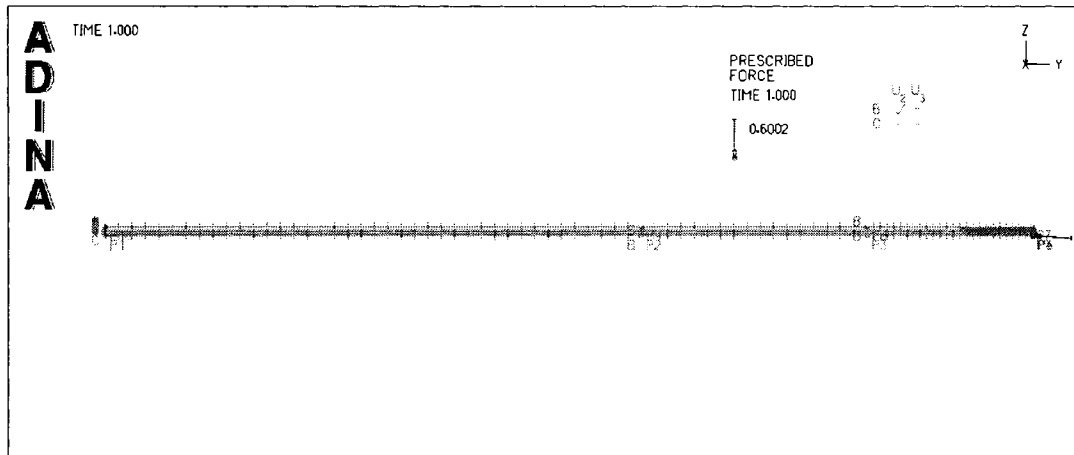


Figure 4.59 : 2^e situation : Charge appliquée sur la zone d'usure D et degrés de libertés fixés en y au point C

Pour ce qui est de la charge appliquée dans la première situation, elle est calculée à partir de la pression linéaire de 35 PLI. Voici le calcul qui permet de transférer cette pression en Newton :

$$P = \frac{35 \text{ pound}}{\text{inch}} * \frac{0,4536 \text{ kg}}{\text{pound}} * \frac{\text{inch}}{25,4 \text{ mm}} * 1 \text{ mm} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 6.1316 \text{ N}$$

Cette charge est alors appliquée avec un angle de 10° avec l'axe des z en C. Il suffit alors de décomposer cette charge selon les axes y et z et de l'appliquer au point 8.

vi. Résultats

Les figures 4.60 et 4.61 montrent les déplacements maximaux en y et les déplacements maximaux en z respectivement.

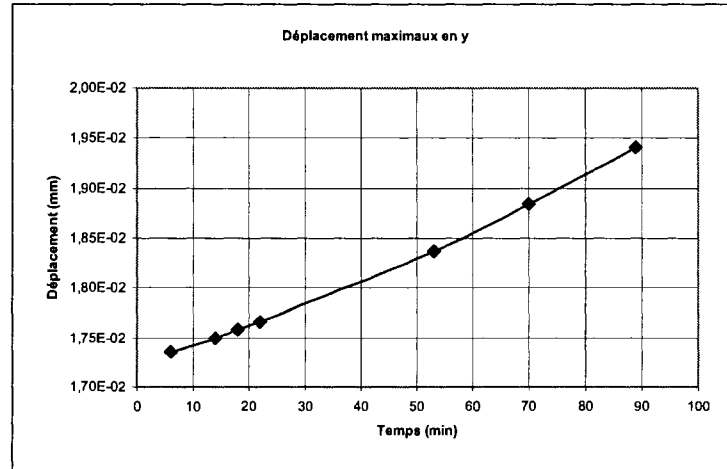


Figure 4.60 : Déplacements maximaux en compression selon l'axe y en fonction du temps d'exposition à l'usure

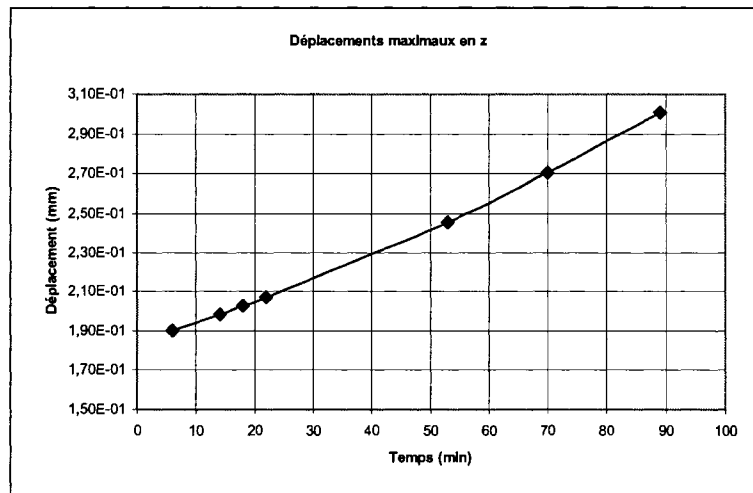


Figure 4.61 : Déplacements maximaux selon l'axe z en fonction du temps d'exposition à l'usure

Il est possible de voir sur ces 2 dernières figures que les déplacements autant en y qu'en z ont tendance à augmenter de façon exponentielle avec le temps d'exposition à l'usure. Il est à noter que les déplacements en y se font dans le sens négatif de l'axe, ainsi il y a présence de compression. Il est aussi possible d'apprécier l'effet de l'agrandissement de la zone de contact entre la lame et le yankee en analysant les déformés des différentes

lames. La figure 4.62 montre les déformés pour des temps d'exposition de 6 et 89 minutes respectivement.

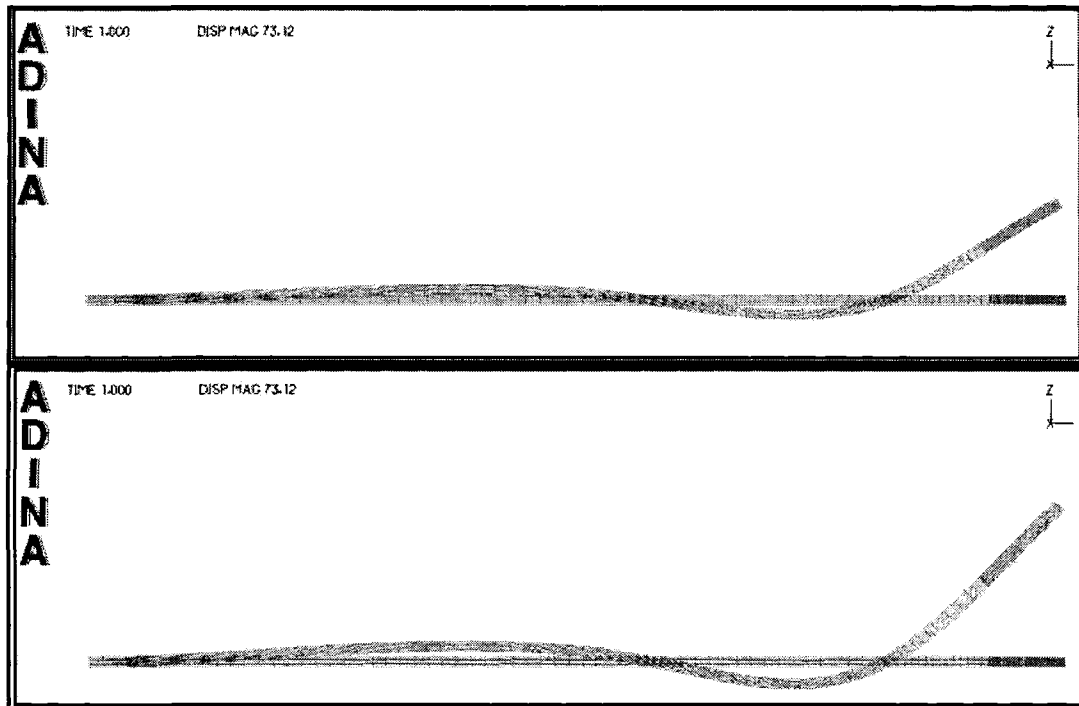


Figure 4.62 : Déformés pour des temps d'exposition à l'usure de 6 et 89 minutes respectivement

Sur cette dernière figure, il est évident que les déplacements sont plus grands lorsque la lame est utilisée plus longtemps. Cette augmentation est due en grande partie au changement dans l'angle de la charge appliquée sur la zone d'usure. L'application de la charge a tendance à être de plus en plus dirigée vers l'axe des z . Il est aussi intéressant de noter que les déplacements maximaux ont tous lieux au mêmes endroit peu importe le temps d'exposition à l'usure. En ce qui concerne les déplacements maximaux en y , ils ont lieu au nœud 2055 qui est situé au centre de la face supérieure de la troisième surface. Pour ce qui est des déplacements maximaux en z , ils ont toujours lieu au nœud qui correspond au point 6, soit à une des extrémités de la zone d'usure.

La figure 4.63 montre quant à elle les contraintes maximales en y et en z en fonction du temps d'exposition à l'usure.

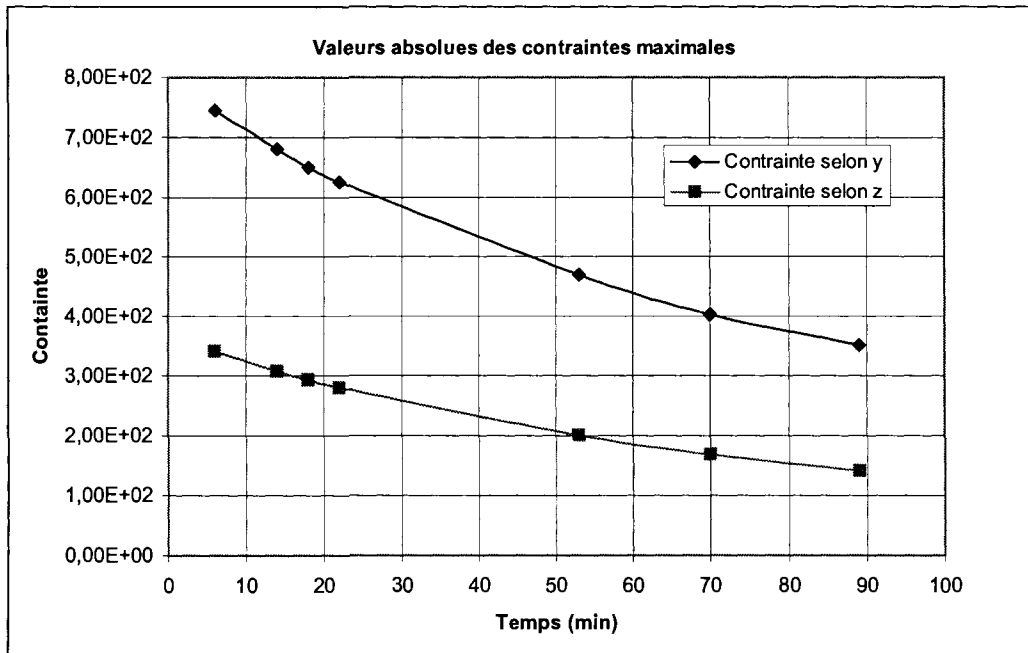


Figure 4.63 : Valeurs absolues des contraintes maximales selon y et z en fonction du temps d'exposition à l'usure

Cette dernière figure montre que les contraintes, contrairement aux déplacements, ont tendance à diminuer avec le temps d'exposition à l'usure. Ainsi, plus la zone de contact entre la lame et le yankee augmente, moins les contraintes ont tendance à être grandes. Ici aussi, on a une variation exponentielle de l'évolution des contraintes en fonction du temps. Il est à noter qu'ici les contraintes en y sont des contraintes de compression tandis que les contraintes en z sont des contraintes de tension. Les figures 4.64 et 4.65 montrent l'emplacement des contraintes au bout de la lame près de la zone d'usure.

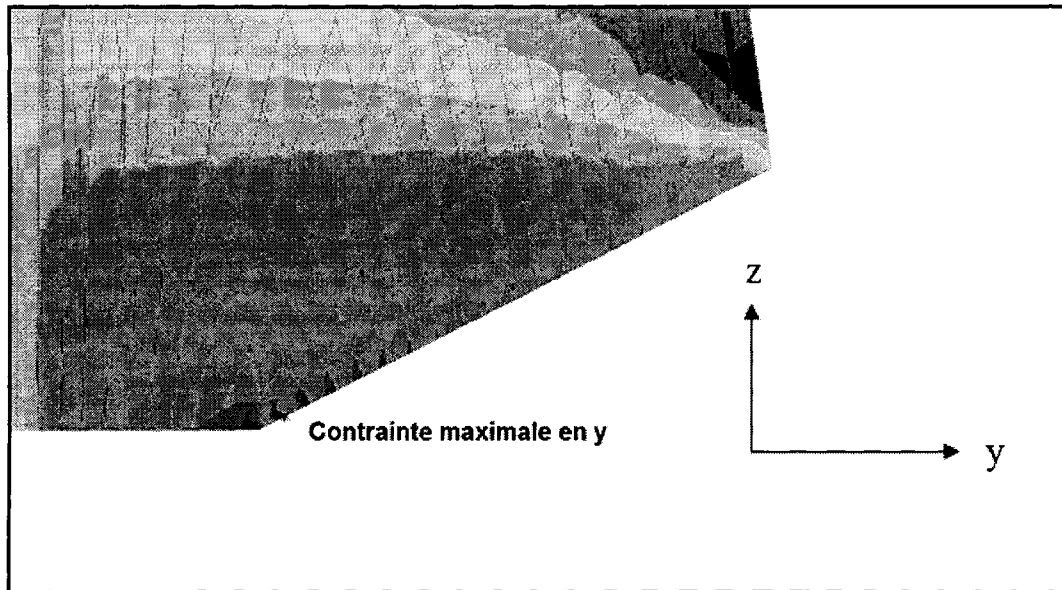


Figure 4.64 : Distribution des contraintes en y près de la zone d'usure pour une exposition à l'usure de 89 minutes

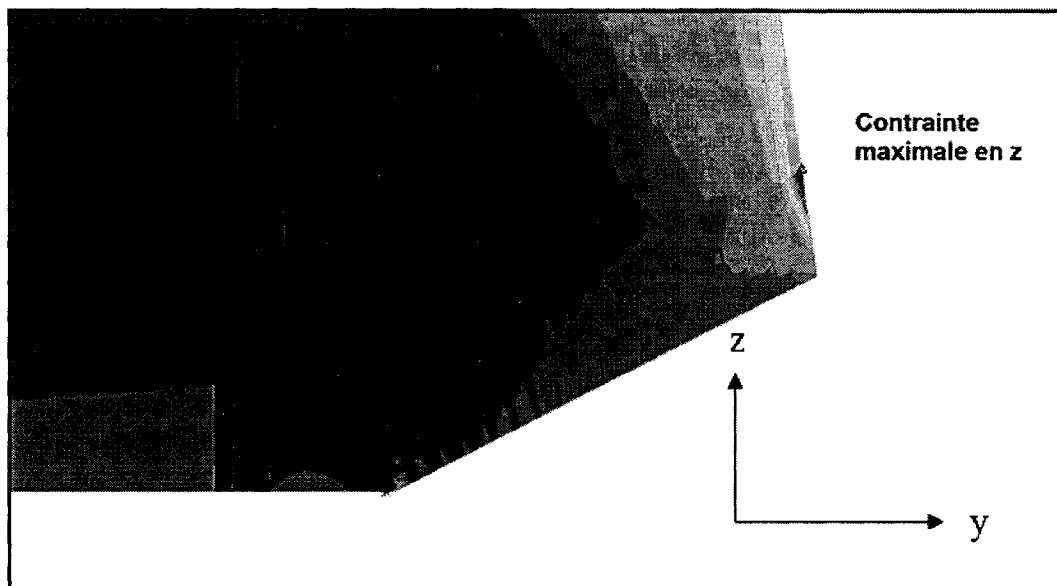


Figure 4.65 : Distribution des contraintes en z près de la zone d'usure pour une exposition à l'usure de 89 minutes

Sur ces figures, plus la couleur tend vers le rouge, plus les contraintes sont positives tandis que plus la couleur tend vers le bleu, plus les contraintes sont négatives. On peut donc voir que selon les axes y et z, les contraintes maximales en compression se retrouvent près du point 5 tandis que celles maximales en tension se retrouvent près du

point 6. Cependant, la valeur absolue des contraintes en compression selon y sont plus grande que celles en tension selon z.

Pour ce qui est des réactions aux appuis, ils ont tendance à augmenter de façon exponentielle avec le temps aux appuis en B et en C tandis que l'effet inverse est observé pour la fixation en A.

Ces résultats montrent bien que le comportement de la lame de crêpage évolue en fonction du temps. Des déplacements plus grands et des contraintes plus petites sont observés au bout de la lame plus le temps d'utilisation de la lame augmente, ce qui entraîne des conséquences non négligeables sur le procédé. En effet, étant donné que la géométrie du bout de la lame est un des facteurs qui influence le plus la qualité du papier, l'usure de la lame fait en sorte que la qualité du papier varie.

La diminution de la pression appliquée sur la surface de contact entre la lame et le yankee, due à l'agrandissement de la zone d'usure, a aussi des conséquences sur le procédé. En effet, plus la pression diminue, moins la lame a un contact solide avec le yankee et plus la feuille de papier a tendance à passer en dessous de la lame sans que celle-ci fasse son travail, c'est-à-dire décoller la feuille. Lorsque ce phénomène se produit, il faut changer de lame le plus rapidement possible afin d'éviter une chute trop longue de qualité du papier.

4.3 Résultats des tests d'émission acoustique

Cette section présente les différents résultats du suivi des mécanismes d'usure des lames par la technique d'émission acoustique réalisés en temps réel et en usine entre décembre 2005 et mai 2007. Ces résultats sont tirés de la procédure expérimentale prédéfinie dans le chapitre précédent. Ainsi, on présentera la distribution des paramètres classiques d'émission acoustique en fonction du temps, ce type de distribution nous permet d'évaluer d'une façon qualitative le comportement des lames durant le crêpage. La sévérité de l'usure subie par les lames et l'analyse des mécanismes sources sont évalués par l'analyse des projections des paramètres RMS en fonction de la fréquence moyenne des signaux d'émission acoustiques et enfin l'analyse des données par la projection des composantes principales permettra de comparer le comportement des lames les unes par rapport aux autres.

4.3.1 Analyse paramétrique des signaux d'émission acoustique en fonction du temps

La tendance de certains paramètres d'émission acoustique en fonction du temps donne généralement une bonne idée de l'évolution du comportement des lames de crêpage durant le procédé. Deux paramètres d'émission acoustique ont été choisis dans l'éventail de ceux fournis par le système d'acquisition PAC : le niveau RMS (racine de la moyenne quadratique) et la fréquence moyenne des signaux. Ces paramètres ont été choisis parce qu'ils fournissent une information de nature différente sur les signaux d'émission acoustique. Le niveau RMS renseigne sur l'énergie libérée lors de la friction entre la lame et le yankee tandis que la fréquence moyenne donne de l'information sur les mécanismes sources d'émission acoustique.

La figure 4.66 représente un signal typique d'émission acoustique détecté durant le processus de crêpage. La nature du signal temporel est complexe et continue, celui-ci est porteur de plusieurs informations reliées à la propagation des ondes dans la lame, à la sévérité du frottement entre la lame et le yankee et aux mécanismes sources d'usure qui prennent forme en fonction du temps dans la lame. La figure 4.67 montre la représentation de ce signal dans un plan temps-fréquence calculé par l'utilisation des techniques des ondelettes.

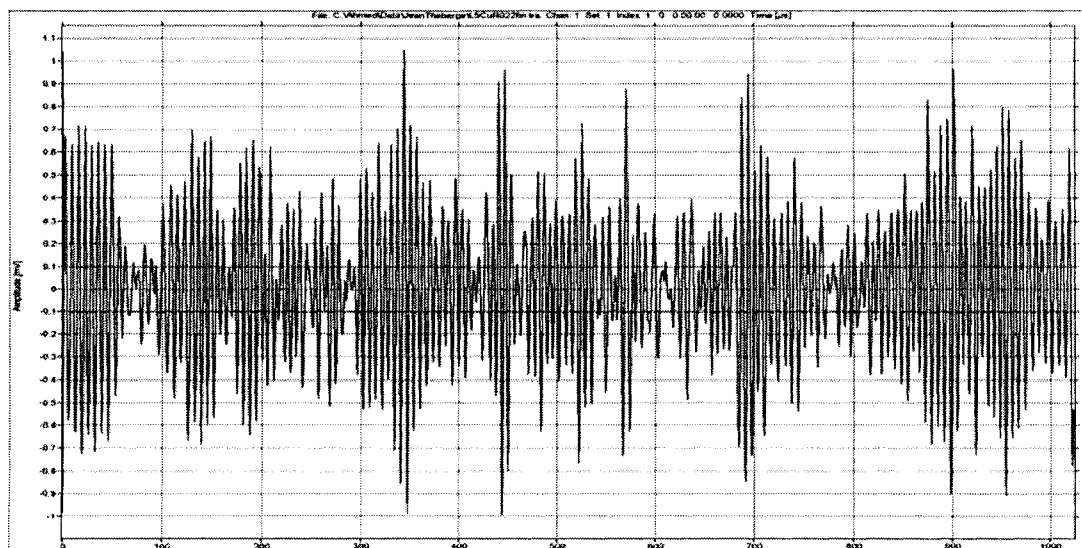


Figure 4.66 : Représentation temporelle d'un signal d'EA émis par le frottement de la lame

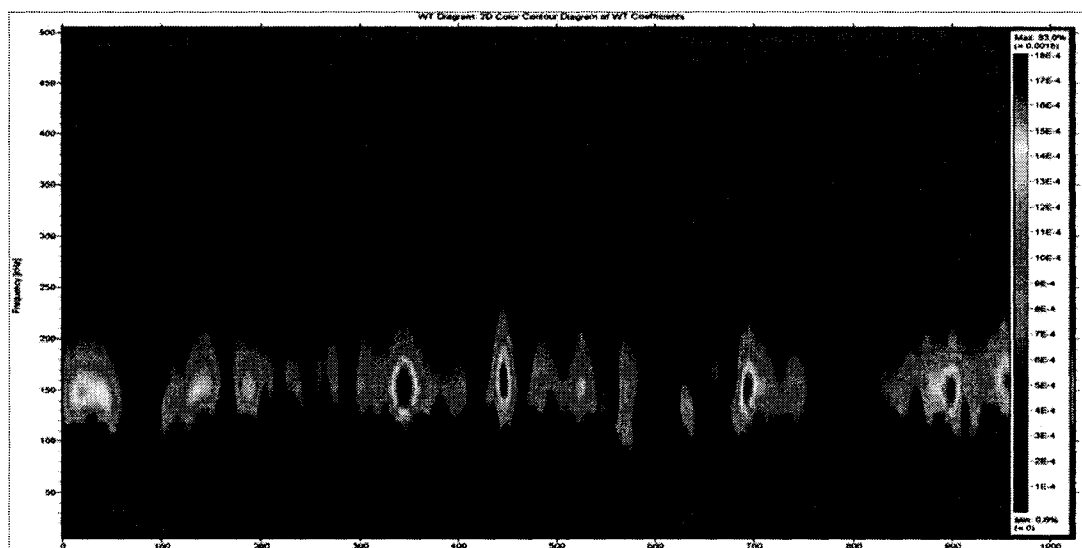


Figure 4.67 : Représentation temps-fréquence du signal de la figure 4.64

La représentation temps-fréquence permet de mettre en évidence la composante dans le signal qui transporte le maximum d'énergie relié au contenu fréquentiel. C'est un indicateur de la nature des mécanismes sources d'usure ayant générés ce type de signal. Ainsi la figure 4.67 permet de conclure que plusieurs phénomènes sources se sont produits en cascade durant le frottement et la figure permet de détecter l'instant d'apparition des mécanismes les plus intenses ainsi que leurs fréquences spécifiques. La figure 4.68 est une représentation en trois dimensions des variables temps - fréquence -

coefficients des ondelettes. La variation du contenu fréquentiel démontre la présence dans un même signal de plusieurs mécanismes sources d'usure.

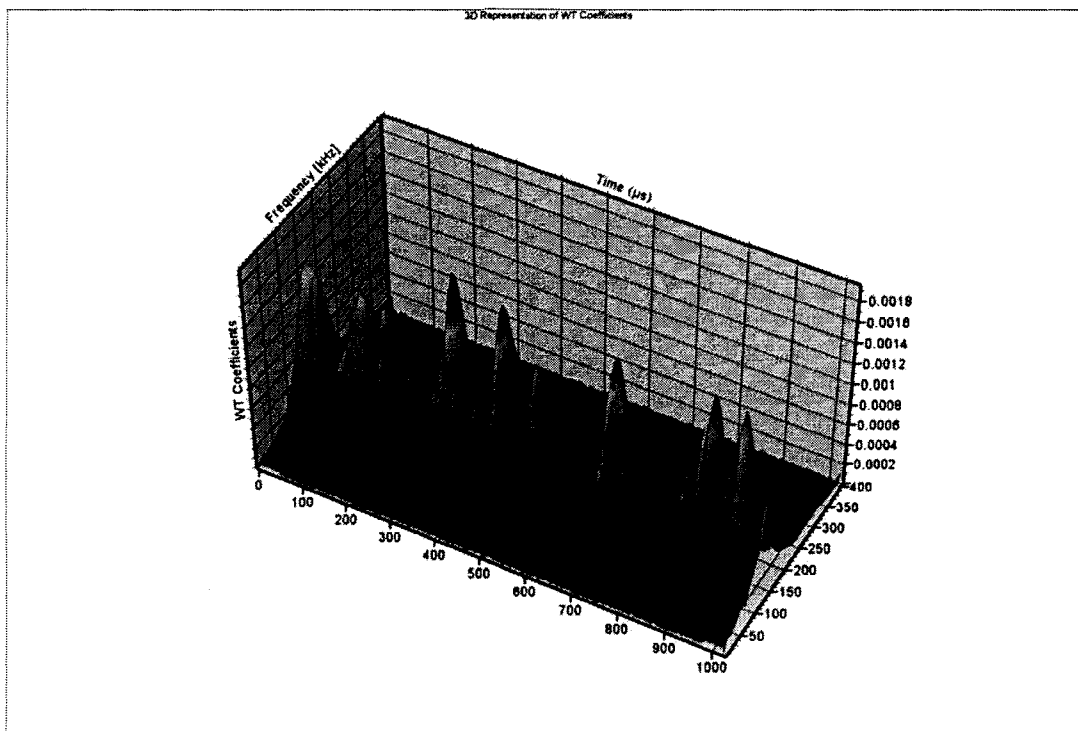


Figure 4.68 : Représentation 3D des coefficients des ondelettes en fonction de la fréquence et du temps.

Pour l'analyse des distributions paramétriques, les lames L5CR003 et L5CR023 ont été choisies pour leur comportement typique.

Les figures 4.69 à 4.72 présentent les tendances du niveau RMS et de la fréquence moyenne des signaux d'émission acoustique en fonction du temps pour ces 2 lames.

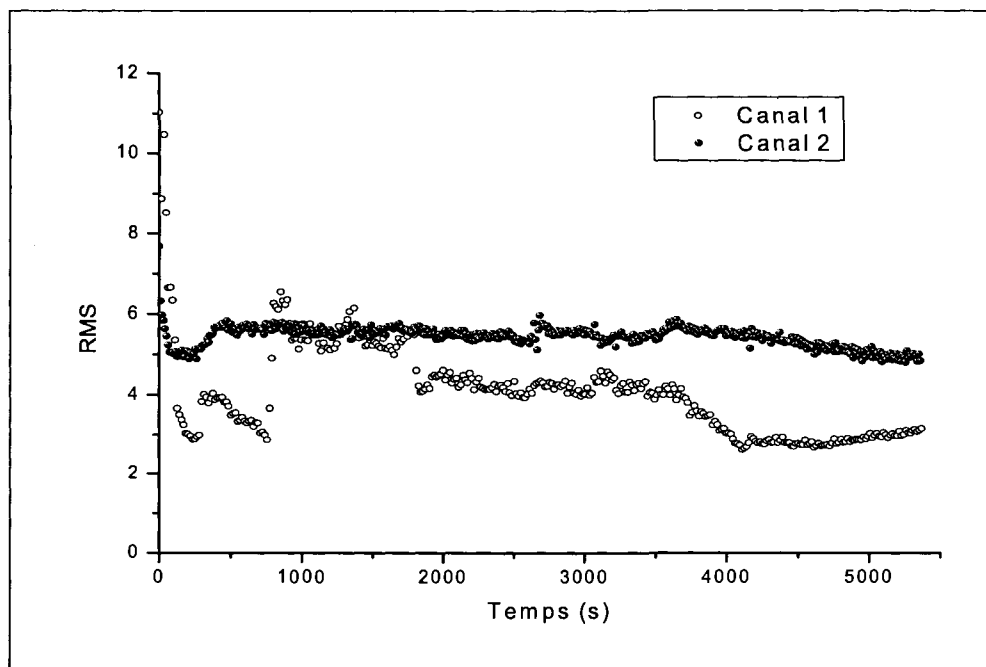


Figure 4.69 : Évolution du niveau RMS en fonction du temps pour la lame L5CR003

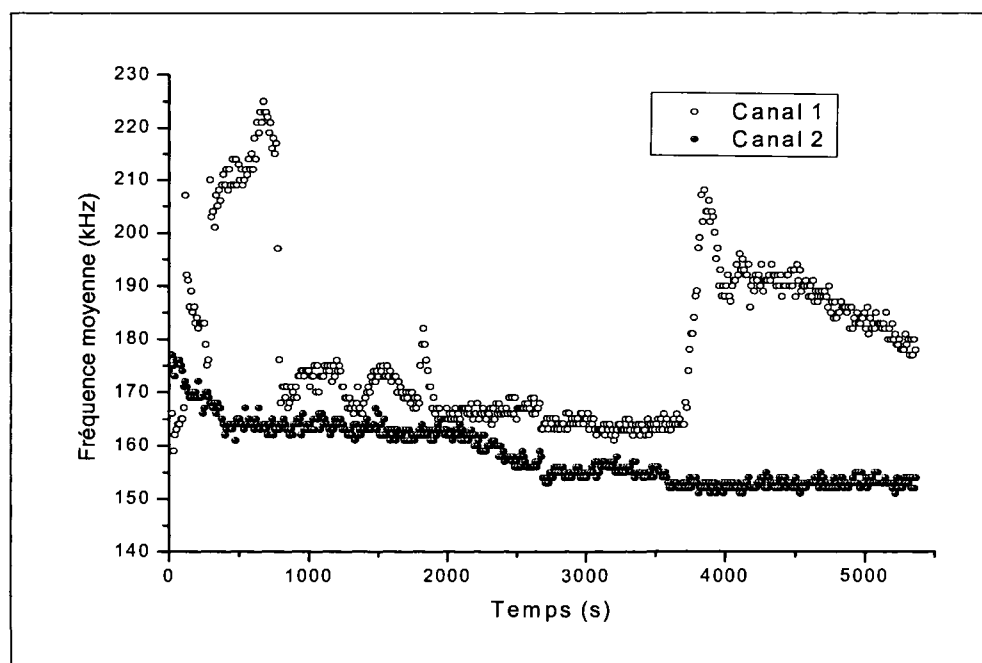


Figure 4.70 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR003

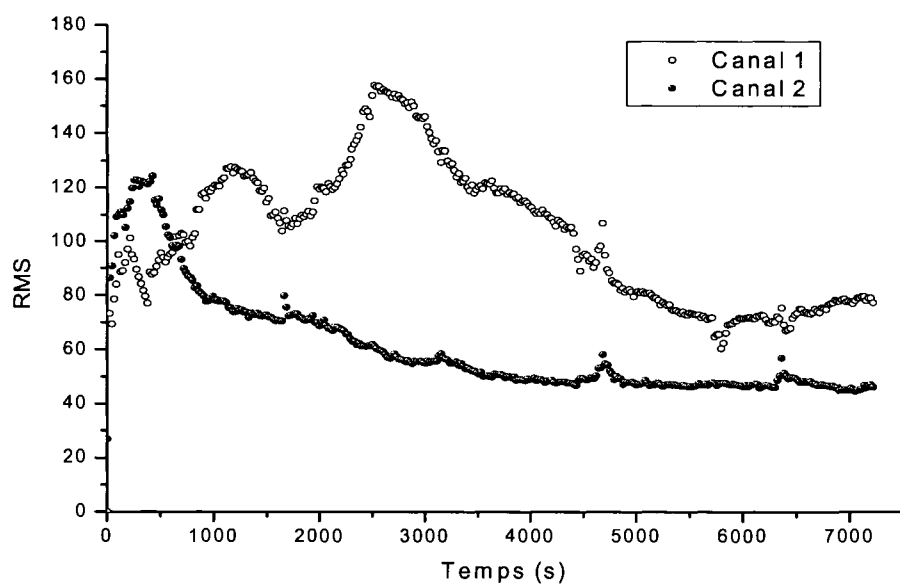


Figure 4.71 : Évolution du niveau RMS en fonction du temps pour la lame L5CR023

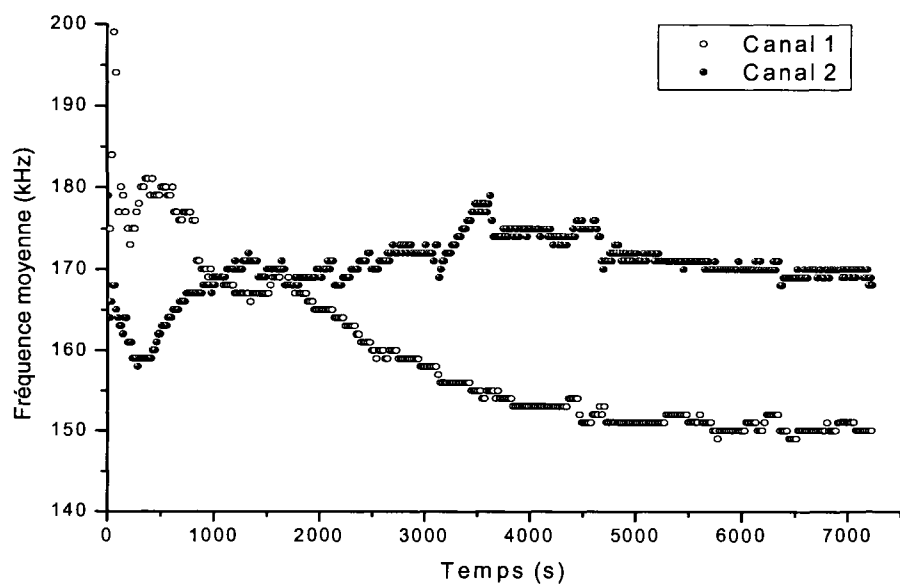


Figure 4.72 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR023

Plusieurs constatations intéressantes peuvent être faites à partir de ces tendances. Tout d'abord, la distribution des amplitudes RMS ne varie pas de façon monotone, mais on observe une variation au début de l'essai qui est caractérisée par une chute brusque de la courbe RMS. Ensuite, tout au long du test, la figure montre des pics de variation qui apparaissent à diverse période de la durée de vie de la lame. Ces variations dans l'évolution de l'émission acoustique suggèrent des phases de dégradation de la lame qui sont indicatrices des intensités des forces de contact et de friction entre la lame, le yankee et le papier qui percute à grande vitesse la lame. Le niveau RMS de la lame L5CR003 se situe dans une gamme de valeur qui va de 3 à 12 millivolts. Pour la lame L5CR023, ce niveau se situe entre 40 et 160 bien que l'amplification des signaux ait été diminuée de 20 dB. Ce niveau n'est pas le même pour toutes les lames car le frottement n'est pas toujours uniforme d'une lame à une autre. Il est à noter que la distribution fournie par le capteur 1 et le capteur 2, présente des tendances variables au niveau de l'énergie des signaux mesurés par le paramètre RMS, surtout dans la zone du début de l'essai et ceci jusqu'à une durée de 800s d'utilisation. Ce phénomène est attribuable au fait que le frottement est inégal entre les deux côtés. Une amplitude RMS plus élevées pour un canal suggère un frottement plus sévère de ce côté de la lame. En général, on remarque que le paramètre RMS a tendance à chuter en fonction du temps, ce qui indique que l'intensité du frottement est de moins en moins forte plus la lame est usée. Les variations observées sur les courbes de distribution d'émission acoustiques témoignent de l'intensité du frottement que subit la lame lorsqu'elle est en contact avec le yankee et le papier.

Il est aussi possible de remarquer une augmentation du niveau RMS des signaux lors du changement de la lame de nettoyage. En effet, de petits sauts du niveau RMS sont remarqués pendant quelques secondes lorsque la lame de nettoyage est enlevée. Ce niveau redescend subitement lorsque la nouvelle lame de nettoyage est remplacée. Ce phénomène est imputable au fait que la friction augmente entre la lame et le yankee en l'absence de lame de nettoyage qui enlève le surplus de colle et de papier collé au yankee. La lame de nettoyage a aussi été suivie par émission acoustique et il a été possible de tracer l'évolution du niveau RMS pour l'usure de cette lame. On peut remarquer que le niveau RMS a tendance à chuter au début pour ensuite se stabiliser. La figure 4.73 montre cette évolution.

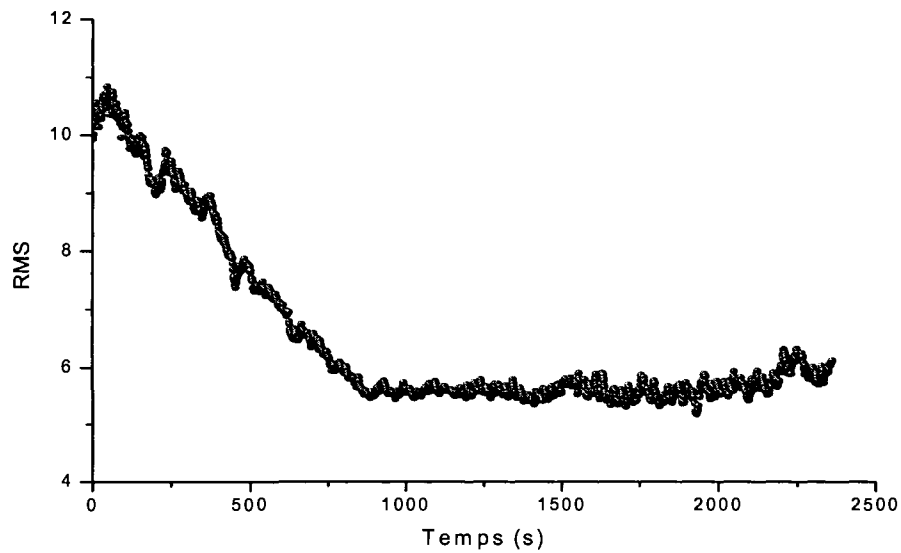


Figure 4.73 : Évolution du niveau RMS en fonction du temps pour la lame de nettoyage L5CC002

Les courbes de distribution de fréquence moyenne montrent des comportements très variés. On retrouve tantôt une augmentation, tantôt une diminution de la fréquence moyenne en fonction du temps. Ces différences peuvent même se manifester dans une seule et même lame tout dépendant du canal qui fait l'acquisition. Cela indique que les sources d'émission acoustique peuvent varier de lames en lames et qu'elles peuvent aussi varier d'un côté à l'autre d'une lame. C'est justement le cas pour la lame L5CR023 comme le montre la figure 4.72. Cette fréquence moyenne se situe entre 140 et 225 kHz pour toutes les lames. Cependant, la plupart des signaux ont une fréquence moyenne oscillant entre 150 et 180 kHz. Le lecteur trouvera toutes les courbes de distribution du niveau RMS et de la fréquence moyenne des différentes lames utilisées dans ce projet à l'annexe III de ce mémoire.

Afin de conclure sur la tendance des distributions des signaux d'émission acoustiques en relation avec les mécanismes sources on présente le cas de la distribution de la lame L5CR023. Cette analyse sera présentée plus tard dans le rapport dans la section corrélation entre l'émission acoustique et l'usure des lames.

4.3.2 Projection des paramètres d'émission acoustique

Pour être en mesure de comparer le comportement des lames entre elles, une projection des paramètres est nécessaire. Les paramètres choisis sont les mêmes que ceux utilisés dans la section 4.3.1, c'est-à-dire le paramètre RMS et la fréquence moyenne. Cette projection a pour abscisse la fréquence moyenne et pour ordonnée le paramètre RMS normalisé. Comme il a été mentionné plus tôt, cette analyse se fait en séparant toutes les lames testées en trois groupes : un groupe avec le grade de papier 1 et une amplification des signaux de 40 dB, un autre avec le grade de papier 2 et une amplification des signaux de 40 dB et un dernier groupe avec le grade de papier 2 et une amplification des signaux de 20 dB. Le tableau 4.8 montre les différentes lames appartenant à ces trois groupes. Pour alléger la lecture du rapport on présente uniquement les projections relatives à un seul capteur identifié dans la légende des plans de projection.

Tableau 4.8 : Groupes de lames

Numéro du groupe	Lames incluses dans le groupe
Groupe 1 (C200, 40 dB)	L5CR003, L5CR004, L5CR006, L5CR008, L5CR009
Groupe 2 (Cu, 40 dB)	L5CR017, L5CR018, L5CR019
Groupe 3 (Cu, 20 dB)	L5CR020, L5CR022, L5CR023, L5CR024

i. Analyse du canal 1 du groupe 1

Pour ce groupe, la normalisation du paramètre RMS est faite en deux parties. Les lames L5CR003 et L5CR004 sont normalisées ensemble à partir du maximum du paramètre RMS de la lame L5CR004 qui est de 12,5 mV. Les lames L5CR006, L5CR008 et L5CR009 sont quant à elle normalisée à partir de la même base qui correspond au maximum du paramètre RMS de la lame L5CR009 qui est de 72 mV. Il est indispensable de normaliser le paramètre RMS car ce paramètre varie beaucoup d'un test à l'autre étant donné les changements apportés au procédé. Les figures 4.74 à 4.77 montrent ces projections pour le canal 1 du groupe 1.

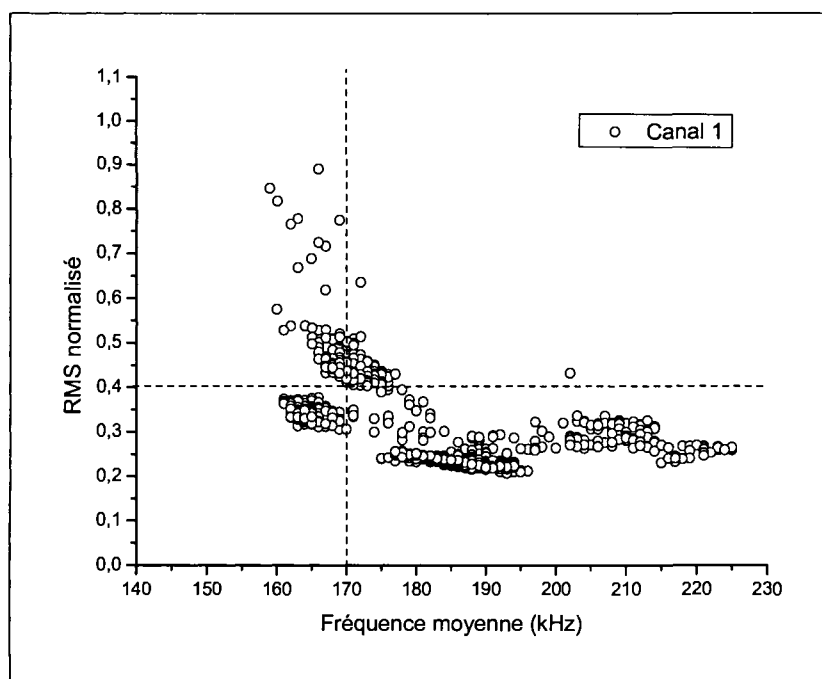


Figure 4.74 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR003

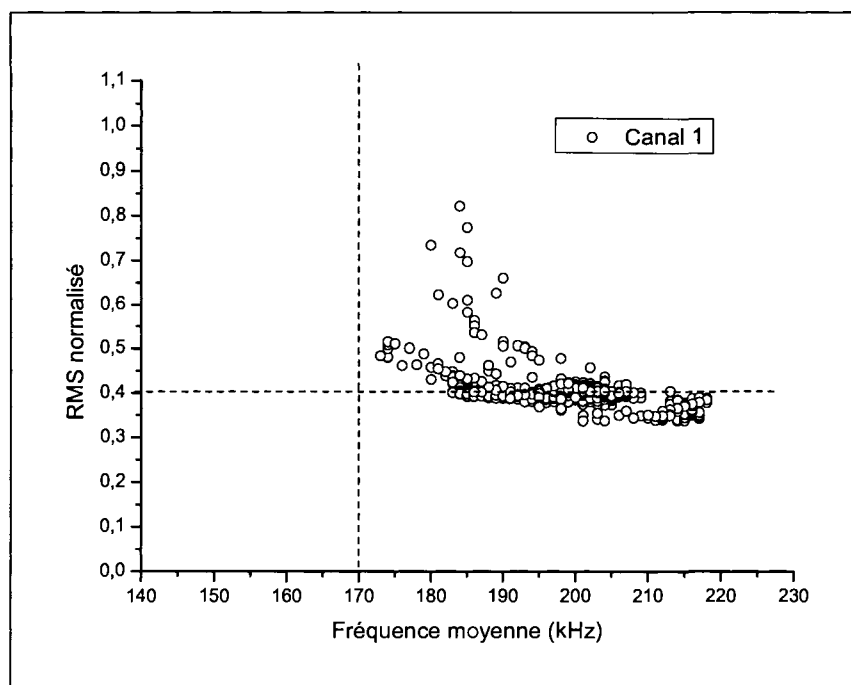


Figure 4.75 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR004

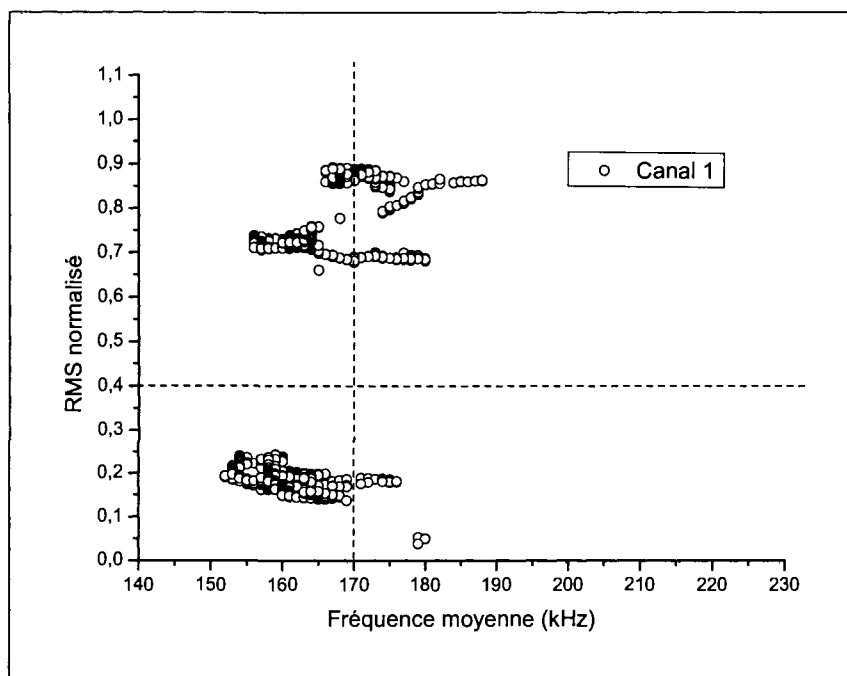


Figure 4.76 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR006

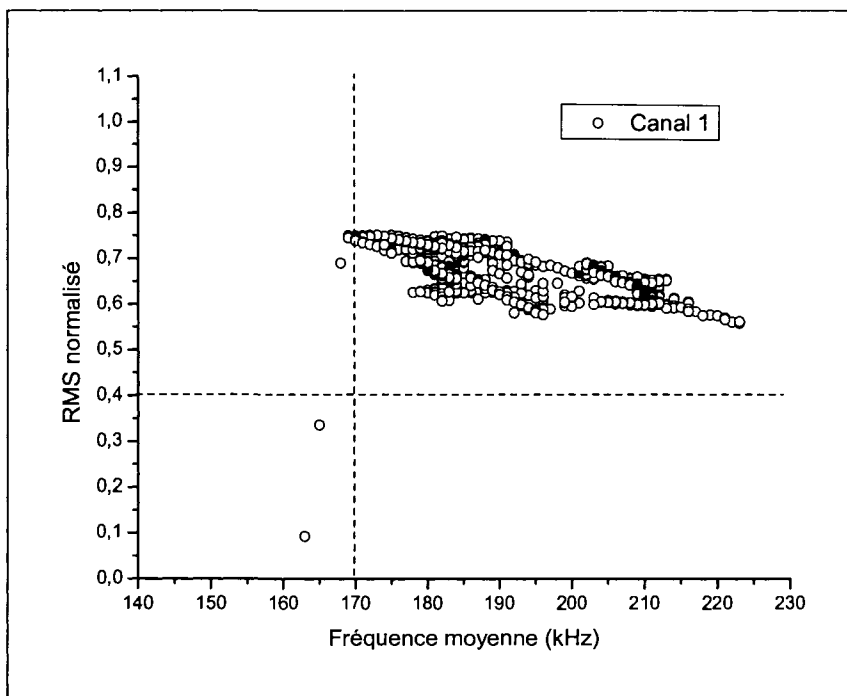


Figure 4.77 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR008

Sur ces dernières figures, des zones ont été délimitées arbitrairement afin de pouvoir faire la comparaison des différentes lames entre elles. La limite en fréquence a été fixée à 170 kHz tandis que la limite du niveau RMS normalisé a été fixée à 0,4. Ainsi, on peut donc définir de signaux basses fréquences les points qui se trouvent à gauche de la limite et de signaux hautes fréquences les points qui se trouvent à droite de la limite. Pour ce qui est du niveau RMS, on peut définir de signaux de basses énergies les points qui se trouvent au dessous de la limite et de signaux de hautes énergies les points qui se trouvent au dessus de la limite.

On peut ainsi voir que les lames ne présentent pas toutes le même comportement car certaines, comme la lame L5CR008 (figure 4.77), comporte des signaux à hautes énergies et à hautes fréquences seulement tandis que d'autres, comme la lame L5CR003 (figure 4.74), comporte des signaux à relativement basses énergies et à des fréquences autant basses que hautes.

ii. Analyse du canal 1 du groupe 2

Pour ce groupe, la normalisation du paramètre RMS se fait à partir du maximum du paramètre RMS de la lame L5CR019 qui est de 70 mV. Les figures 4.78 à 4.80 montrent ces projections pour le canal 1 du groupe 2. Il est à noter que l'amplification des signaux pour ces tests est un peu trop grande (40 dB), ce qui cause la saturation des signaux d'émission acoustique. Ce phénomène est d'autant plus marqué pour les premiers signaux qui ont une énergie élevée.

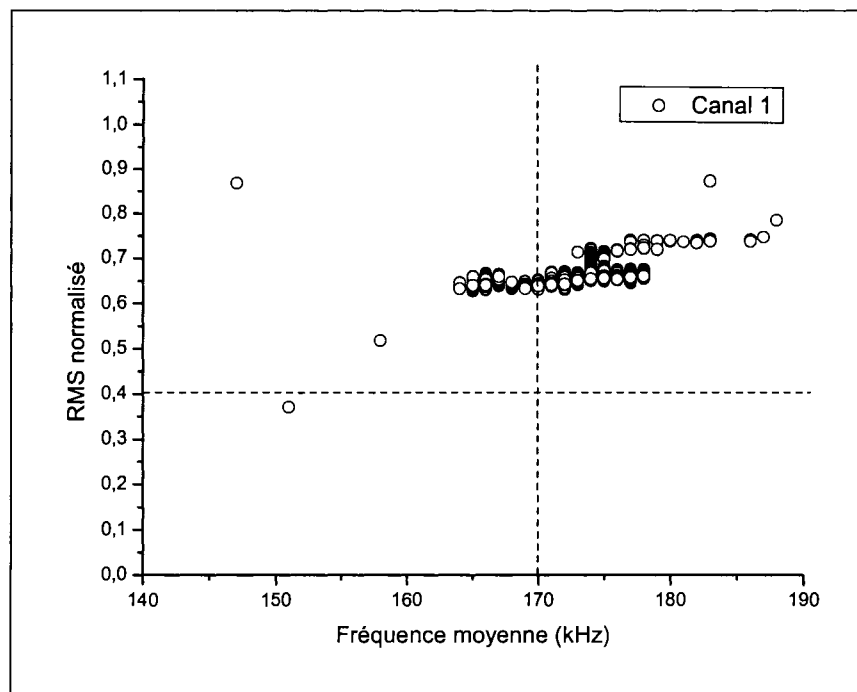


Figure 4.78 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR017

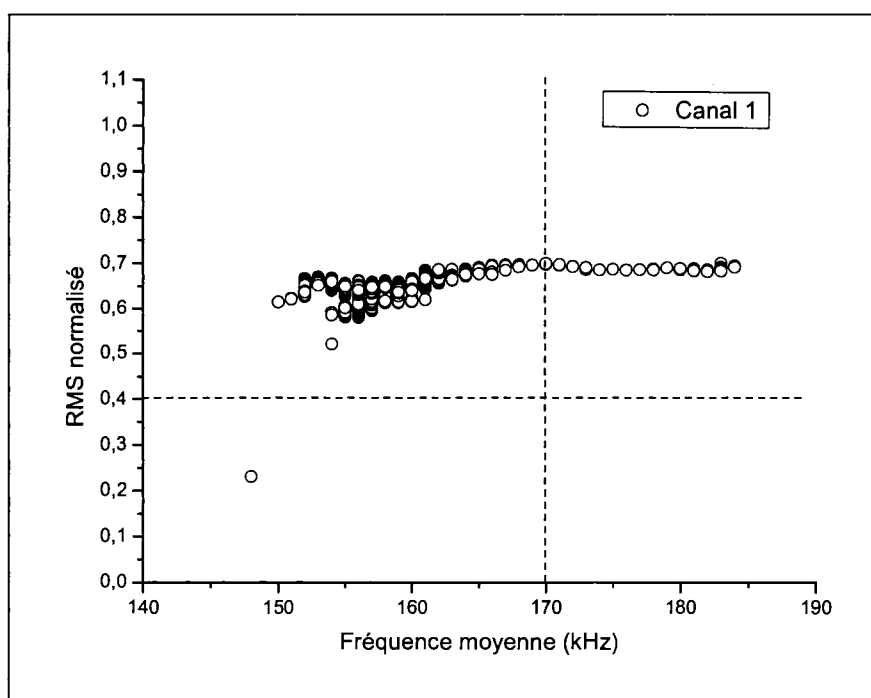


Figure 4.79 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR018

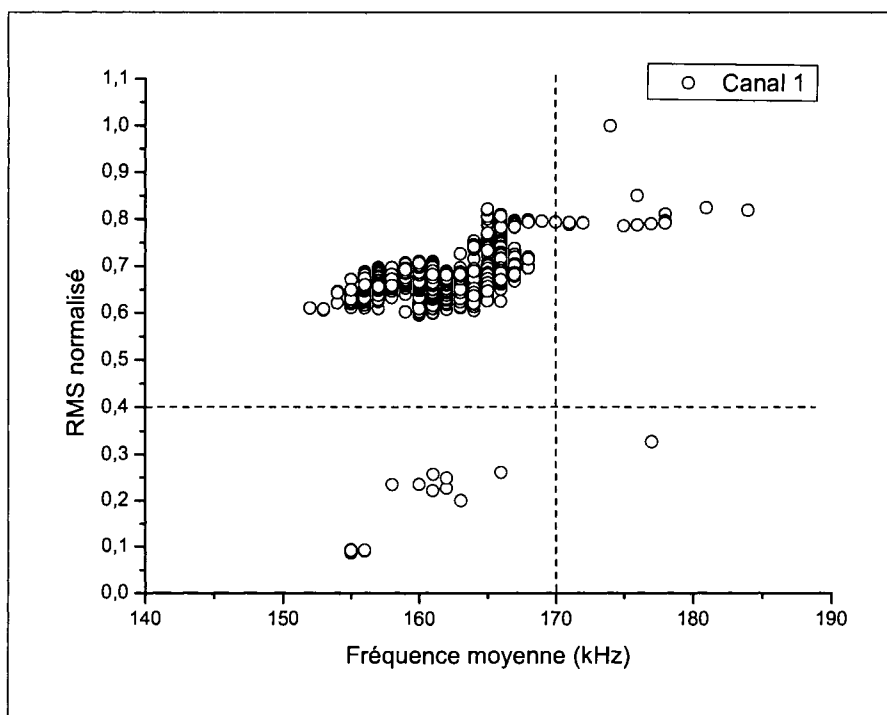


Figure 4.80 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR019

Pour ces lames, les mêmes limites arbitraires ont été apposées sur les figures, soit 170 kHz pour la fréquence et 0,4 pour le paramètre RMS normalisé. Il est intéressant de constater que les niveaux d'énergie restent relativement élevés pour les signaux de ces lames et que la fréquence est en moyenne faible.

iii. Analyse du canal 1 du groupe 3

Pour ce groupe, la normalisation du paramètre RMS se fait à partir du maximum du paramètre RMS de la lame L5CR024 qui est de 200 mV. Les figures 4.81 à 4.84 montrent ces projections pour le canal 1 du groupe 3.

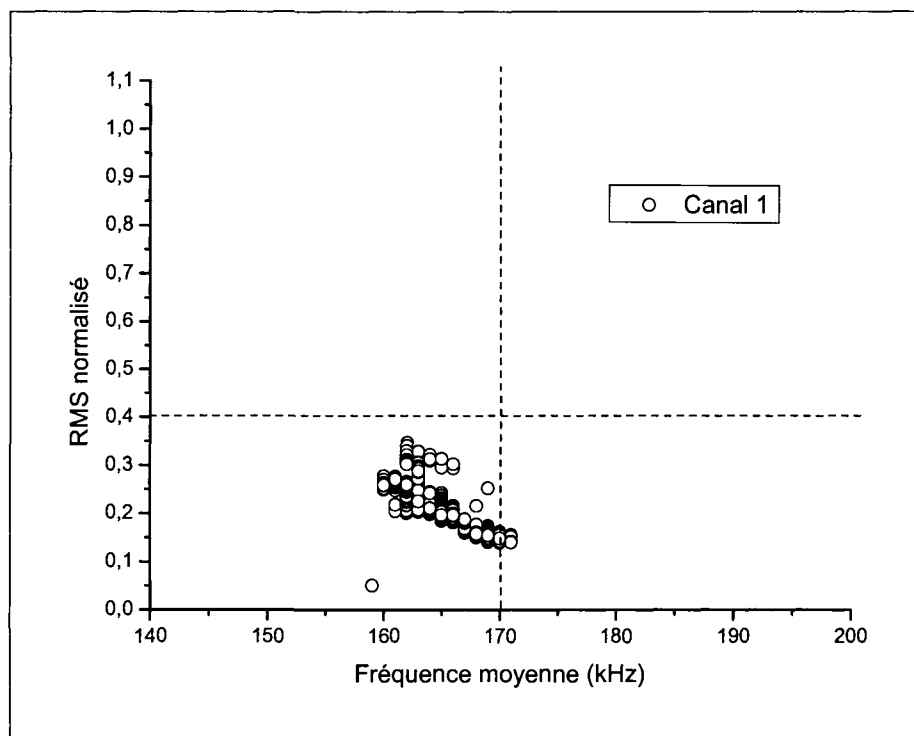


Figure 4.81 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR020

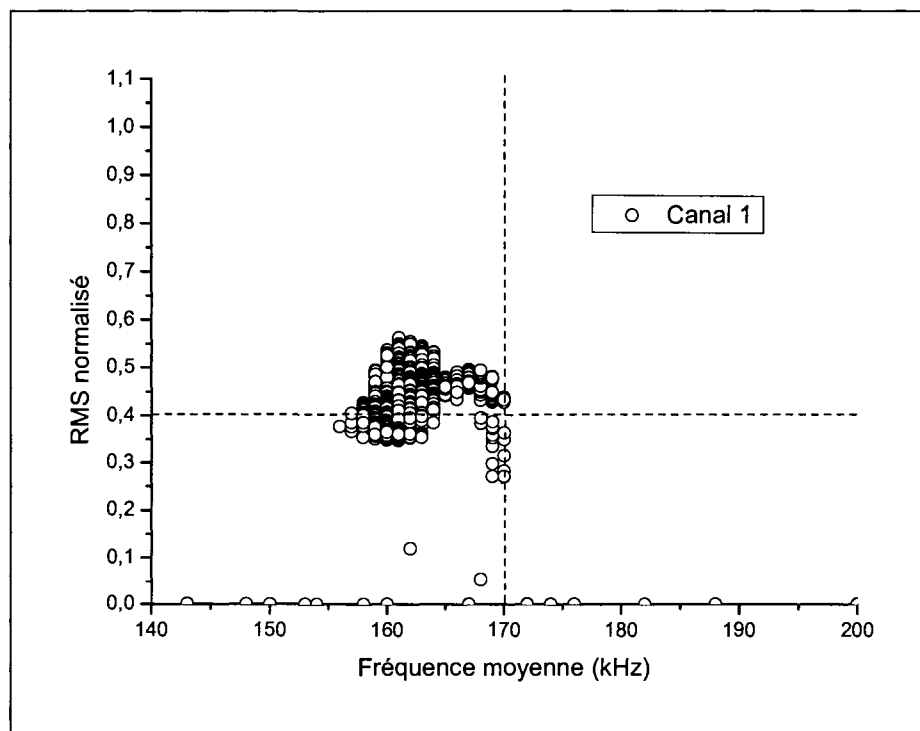


Figure 4.82 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR022

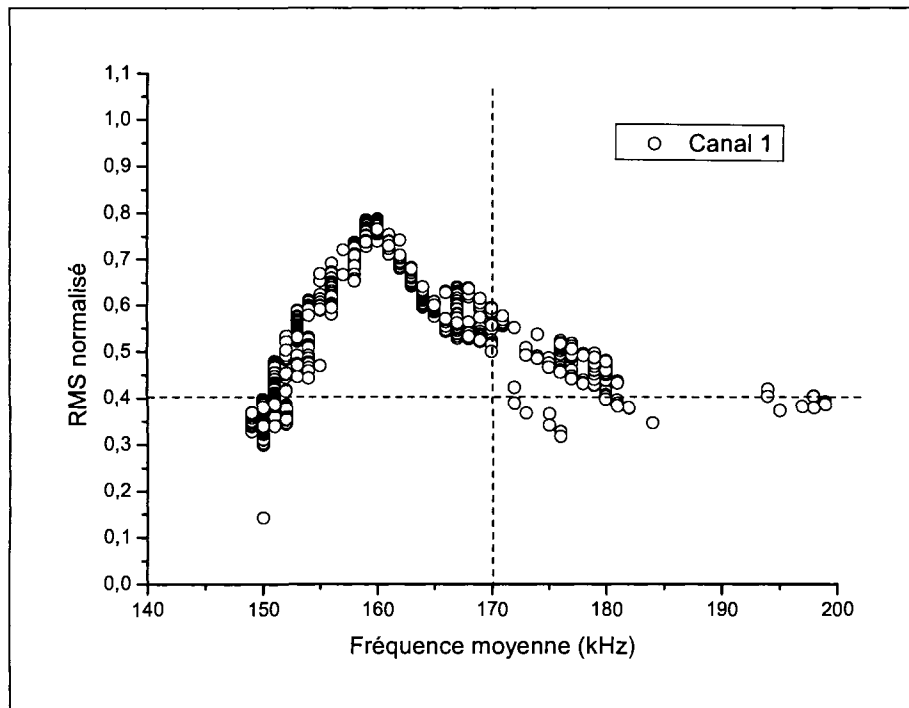


Figure 4.83 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR023

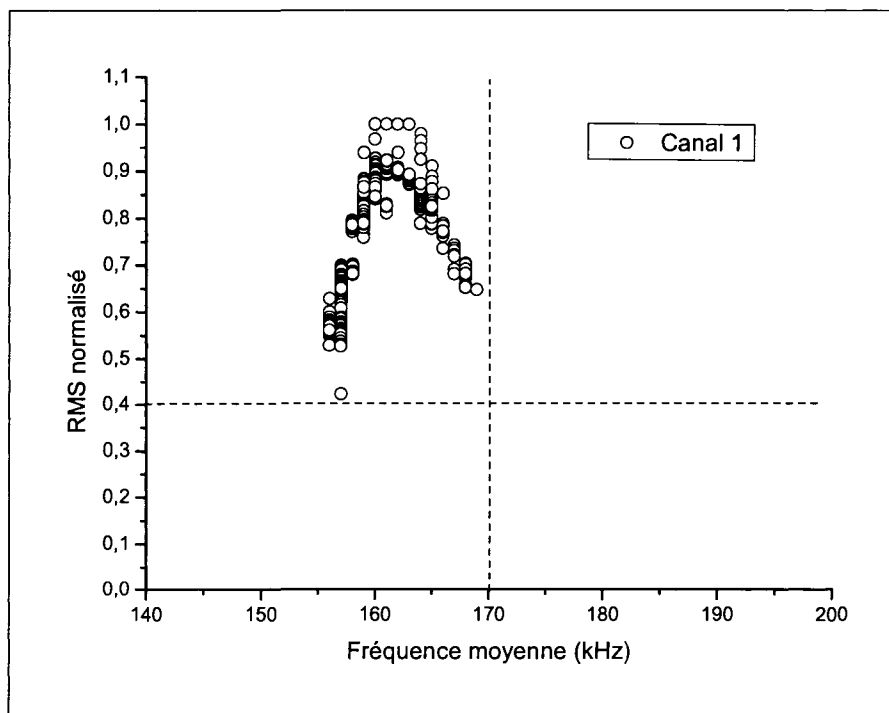


Figure 4.84 : Projection du RMS et de la fréquence moyenne pour le canal 1 de la lame L5CR024

Encore ici, les mêmes limites arbitraires ont été apposées sur les figures, soit 170 kHz pour la fréquence et 0,4 pour le paramètre RMS normalisé. On peut remarquer que les fréquences sont relativement basses pour les signaux de ces lames et que leur énergie est normalement élevée sauf pour les signaux de la lame L5CR020 (figure 4.81) qui ont des énergies relativement basses.

La conclusion sur les résultats de cette section sera présentée plus en détails dans la section 5.7 intitulée corrélation entre l'émission acoustique et l'usure des lames.

4.3.3 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales des paramètres d'émission acoustique à l'aide du logiciel Noesis^{MD} permet aussi de comparer les lames entre elles. Ici aussi, on sépare les différentes lames avec les mêmes groupes que ceux utilisés à la section précédente. Pour faire l'analyse en composantes principales, les 7 paramètres suivant sont sélectionnés : le compte, l'énergie, l'amplitude, la fréquence moyenne, le RMS, la force du signal et l'énergie absolue. Ensuite, une standardisation est appliquée afin de transformer toutes les données pour qu'elles aient une moyenne nulle. On garde ensuite les 3 premières composantes principales et on présente l'histogramme de la première composante principale en cumulatif. Pour cette analyse, les différents canaux sont séparés. Dans ce rapport on présente uniquement les résultats du capteur 1 identifié par la légende canal 1. La figure 4.85 donne l'évolution cumulative de la première composante principale en fonction du temps pour les lames du groupe 1.

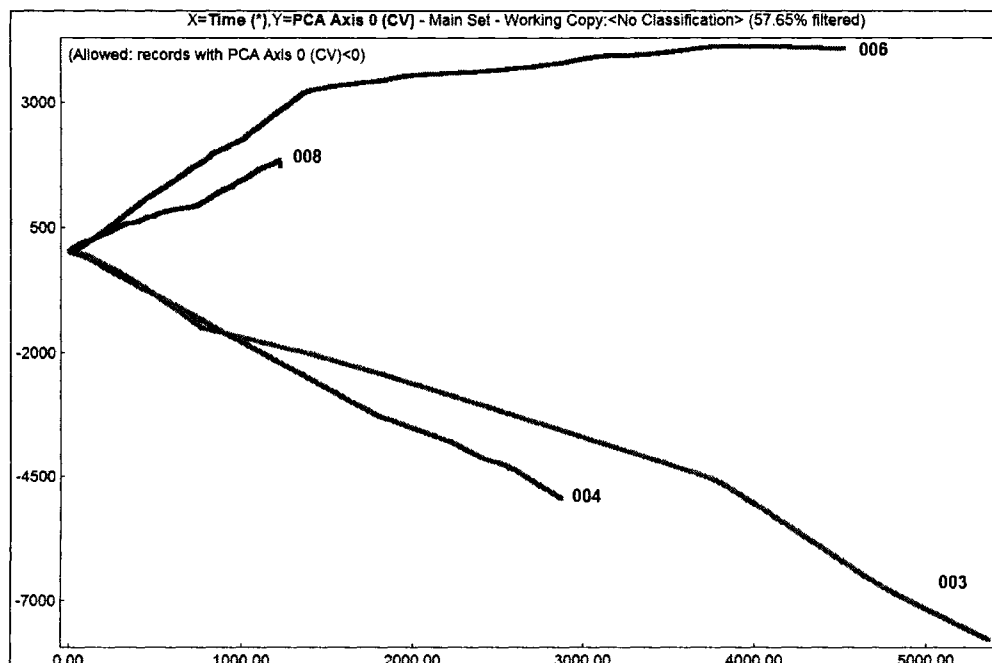


Figure 4.85 : Première composante principale en cumulatif en fonction du temps pour le canal 1 du groupe de lames 1

L'avantage de cette technique de réduction des données est qu'elle permet une analyse globale des lames sur un même graphique. En effet la figure montre que le comportement des lames durant le procédé de crêpage n'est pas identique. Toutefois, les lames L5CR003, testée le 31 mai 2006, et L5CR004, testée le 2 juin 2006, démontrent une tendance similaire, les courbes varient avec des pentes négatives. Tandis que les lames L5CR006, L5CR008, toutes testées le 13 juin 2006, ont un comportement semblable et varient avec des pentes positives. Ces dernières lames semblent avoir subi une usure cumulative plus grande que les autres étant donné que l'énergie plus grande des signaux d'émission acoustique. De plus il est intéressant de noter que le comportement des lames L5CR006, L5CR006, est pratiquement le même jusqu'à un temps de 600 secondes après quoi on remarque une certaine divergence. Cette plage de temps correspond au rodage de la lame quand l'usure est très sévère. Ces variations de tendance sont observées sur les lames du groupe 2 et du groupe 3, tel que présentés par les figures 4.86 et 4.87.

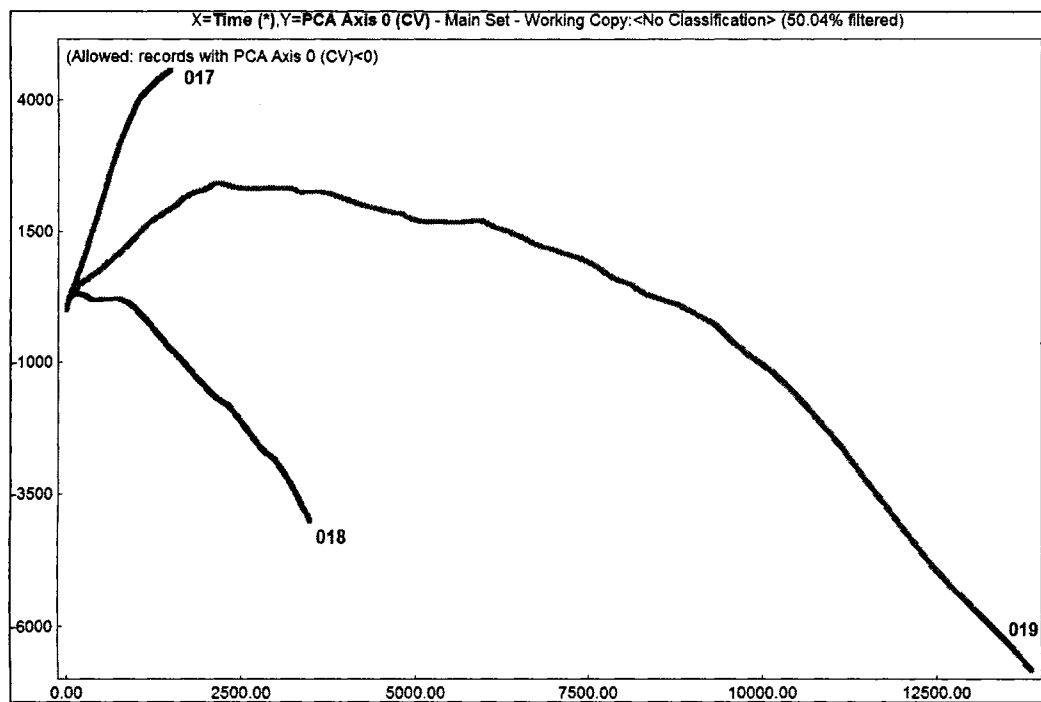


Figure 4.86 : Première composante principale en cumulatif en fonction du temps pour le canal 1 du groupe de lames 2

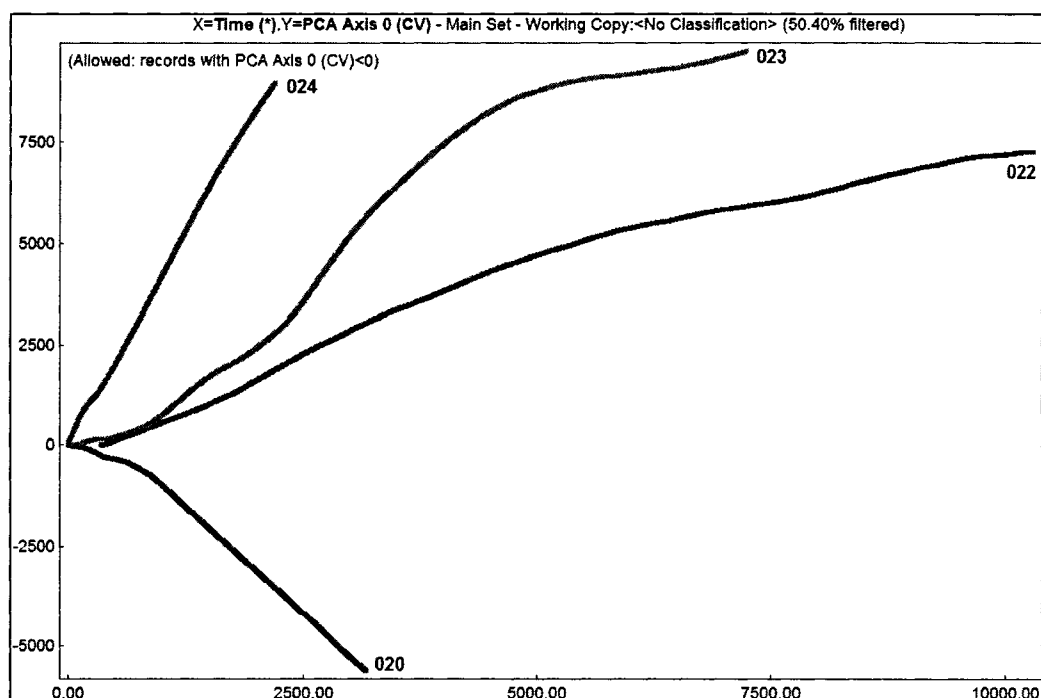


Figure 4.87 : Première composante principale en cumulatif en fonction du temps pour le canal 1 du groupe de lames 3

En guise de conclusion, la technique des composantes principales a permis de comparer l'usure cumulative entre les lames. Le frottement des lames est plus ou moins variable dépendant des conditions environnementales favorisant une usure sévère ou modérée, des conditions géométriques des lames, tel que les conditions de cambrage mesurées auparavant, qui favorisent des pressions élevées sur des endroits spécifiques suivant la largeur des lames, des conditions métallurgiques du matériau favorisées par l'échauffement des lames et des déformations plastiques induites aux niveau de la pointe des lames. Tous ces phénomènes ne favorisent pas des conditions de crêpage uniformes et donc une qualité de papier constante.

5. CORRÉLATION DES DONNÉES

Cette section présente les corrélations qui existent entre les tests qui ont été effectués sur le papier, sur les lames et au niveau de l'émission acoustique. Ces corrélations permettent, entre autres, d'identifier certaines causes de l'usure des lames et de l'évolution de la qualité du papier.

5.1 Corrélation entre la largeur des lames et la qualité du papier

Pour cette analyse, les résultats de la section 4.2.4 qui concernent l'évolution de la largeur des lames de crêpage ont été utilisés. Pour faire correspondre la qualité du papier à la largeur des lames, 10 échantillons de papier ont été pris. Ceux-ci étaient répartis sur toute la longueur de la lame. Les lames choisies pour cette analyse sont les lames L5CR019 et L5CR022 avec les échantillons de papier correspondants : c'est-à-dire les échantillons 6756 et 6813 respectivement. Pour les tests sur le papier, 5 paramètres ont été mesurés : le poids de base, le bouffant, la résistance sens machine, la résistance sens transverse et la fréquence de crêpe. Les figures 5.1 et 5.2 montrent l'évolution longitudinale du bouffant et du GMT en rapport avec la largeur de la lame pour les lames L5CR019 et L5CR022 respectivement.

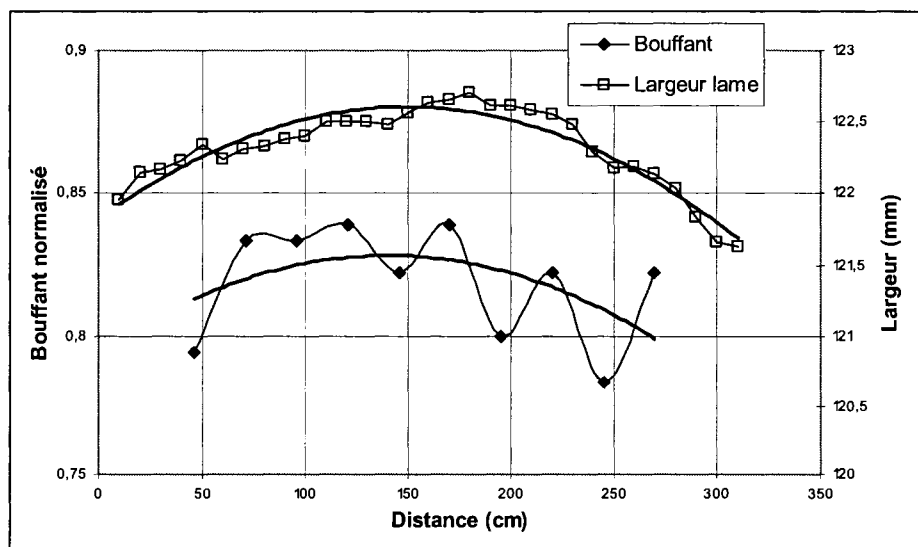


Figure 5.1 : Bouffant normalisé et largeur de la lame en fonction de la position sur la lame L5CR019

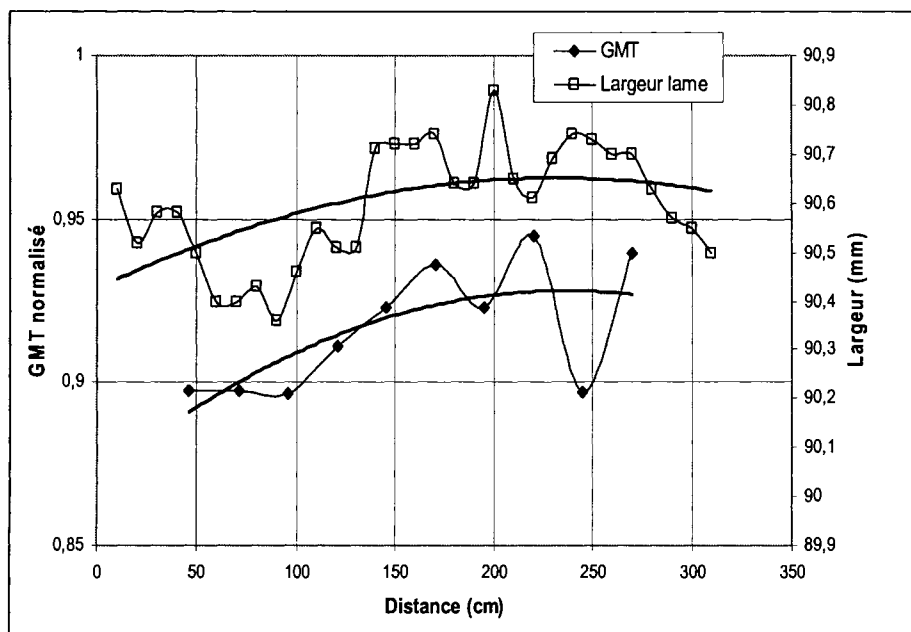


Figure 5.2 : GMT et largeur de la lame en fonction de la position sur la lame L5CR022

Il est possible de remarquer sur ces figures que la largeur de la lame est intimement liée aux paramètres de qualité du papier. En effet, le bouffant suit la même tendance que la largeur de la lame. Il en est de même pour le GMT, un paramètre calculé à partir des résistances sens machine et sens transverse. Plus la lame est large, plus le bouffant et le GMT sont grands. Ceci est probablement dû au fait que la lame large a un meilleur contact avec le yankee. Ainsi, la lame peut effectuer d'une meilleure façon son action sur la feuille de papier étant donnée le bon contact entre celle-ci et le yankee. Le problème avec les lames courbées est que seules les parties de lame les plus larges entrent adéquatement en contact avec le yankee. Il existe donc des endroits où la lame n'a pas un très bon contact avec le yankee et la qualité du papier s'en ressent. Cette étude permet aussi de réaliser à quel point les paramètres de qualité du papier peuvent varier selon la position sur la lame de crêpage. Pour l'échantillon de la lame L5CR019, on peut remarquer une différence de bouffant de 10 microns entre le milieu et le côté de la lame. Il faudrait être en mesure de contrôler la qualité des lames ou du moins la qualité de l'aiguisage de celles-ci afin de contrer la non homogénéité de la qualité du papier le long de la lame.

5.2 Corrélation entre le gradient de pression du docteur, la largeur et l'usure des lames

Dans la dernière section, il était question de l'effet de la largeur des lames sur la qualité du papier. En fait, cette largeur a aussi un effet sur l'usure des lames. Il a été remarqué que les lames ne s'usent pas toutes uniformément. Comme il a été démontré dans la section 4.2.5, le centre des lames comporte toujours un biseau d'usure plus large que sur les côtés. Ceci est imputable au fait que les lames sont normalement plus larges au milieu que sur les côtés après quelques aiguissages. De plus grandes largeurs impliquent un contact plus intime entre la lame et le yankee, et donc une usure plus sévère. La figure 5.3 montre ce phénomène en faisant le lien entre la largeur du biseau d'usure et la largeur de la lame pour la lame L5CR019.

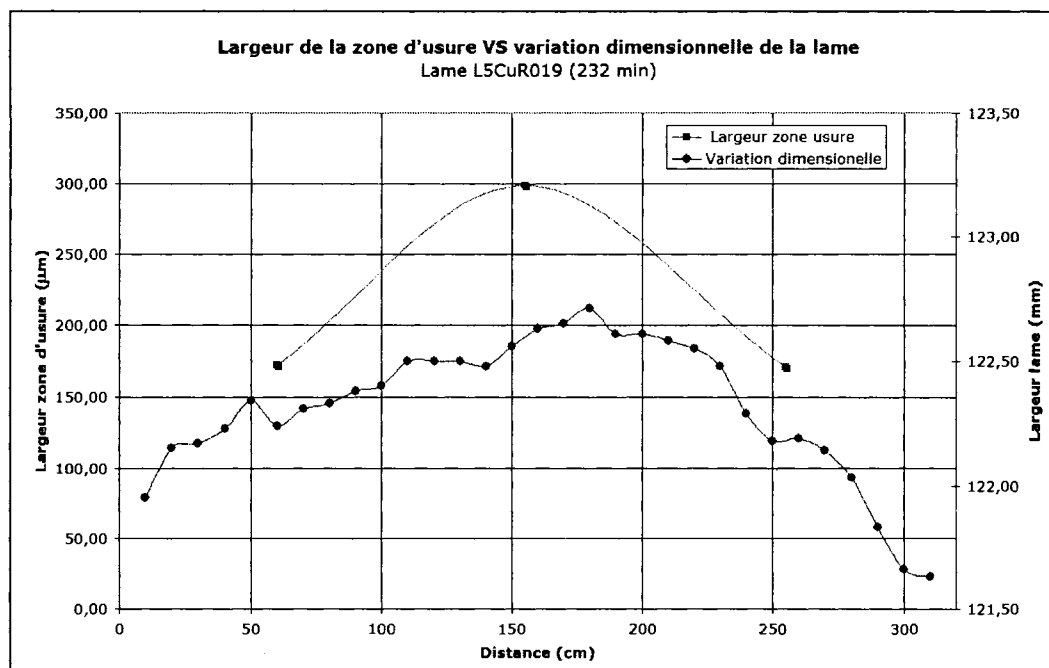


Figure 5.3 : Largeur de la zone d'usure VS variation dimensionnelle le long de la lame L5CR019

Cependant, la largeur des lames n'est pas la seule responsable de l'usure plus importante des lames au centre de celles-ci. La pression exercée par la lame sur le yankee n'est pas constante sur toute la longueur de la lame. En fait, le docteur qui supporte la lame comprend 41 vis de serrage qui permettent l'application d'une pression plus ou moins forte sur le yankee. Les ajustements fins, faits avec les vis de serrage servent, en fait, à ce que la lame de crêpage épouse le plus parfaitement possible la

surface du yankee. En effet, pour des raisons d'usures, de bombage (avec la pression de vapeur et la chaleur), la face du yankee n'est pas parfaitement lisse, ni droite. Elle peut comporter un certain bombage et des stries. La figure 5.4 montre l'ajustement des vis de serrage du docteur pour la machine à papier de Lennoxville.

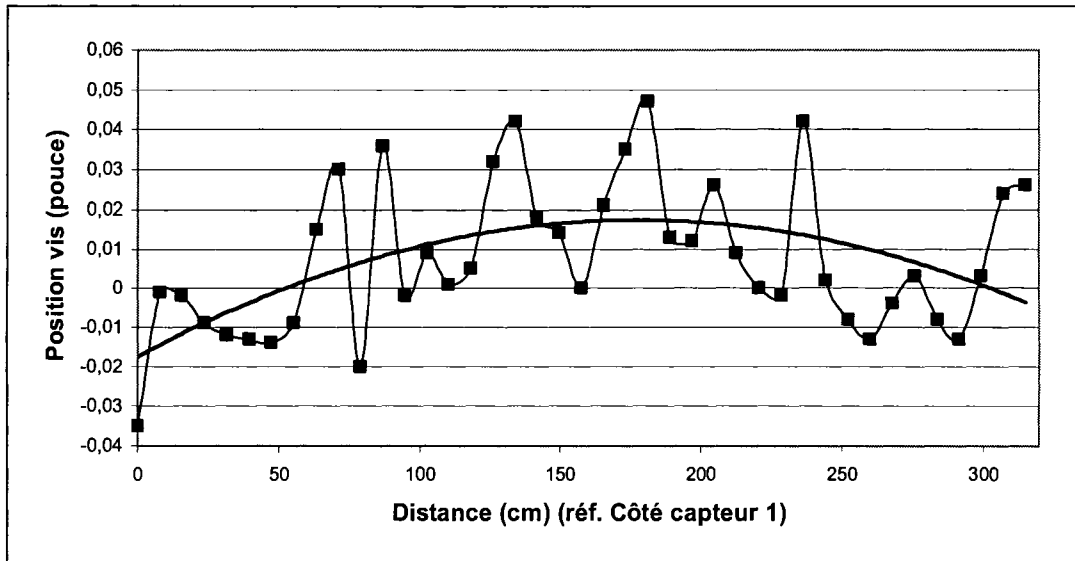


Figure 5.4 : Ajustement des vis de serrage du docteur pour la machine de papier de Lennoxville

Sur ce graphique, les valeurs positives signifient que la lame est plus proche du yankee en ces endroits. On peut voir que le serrage est plus significatif au centre de la lame qu'aux extrémités. Ainsi, on se retrouve avec 2 facteurs qui peuvent influencer l'usure plus importante au centre de la lame : la largeur des lames et l'ajustement des vis de serrage du docteur. Cet effet combiné peut expliquer les variations dans la qualité du papier le long de la lame.

5.3 Corrélation entre l'évolution de la zone de contact et de la pression effective et l'évolution de la qualité du papier en fonction du temps

On a pu voir, dans la section 4.2.8 qui traite des tests fait au MEB, que l'augmentation de la zone de contact due à l'usure de la lame avait pour effet de faire diminuer la pression effective de la lame sur le yankee. Cette diminution de pression a indéniablement un effet sur le procédé de crêpage et par le fait même sur la qualité du papier produit. Afin de

prouver ce point, il faut revenir sur les résultats de la section 4.1.2 qui traite de l'évolution des paramètres papier en fonction du temps. Pour ce faire, il a été convenu qu'un rouleau est produit à toutes les 25 minutes. La figure 5.5 montre le lien qui existe entre l'évolution de la pression entre la lame et le yankee avec celle de la qualité du papier en fonction du temps.

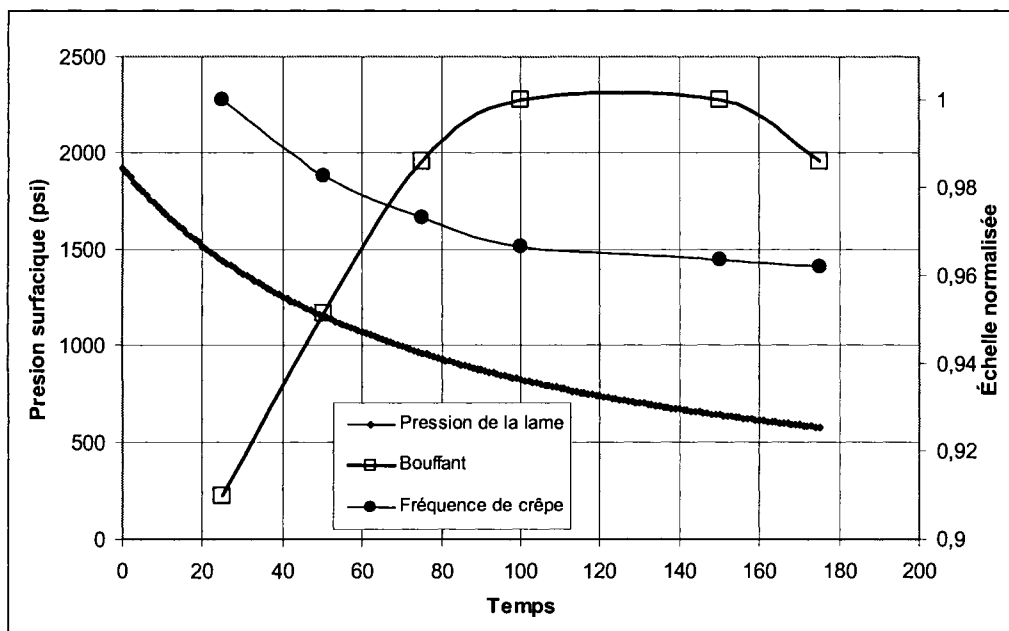


Figure 5.5 : Évolution de la pression, du bouffant et de la fréquence de crêpe en fonction du temps

Cette figure fait remarquer que la diminution de pression est proportionnelle à l'évolution de la fréquence de crêpe du papier et qu'elle est ainsi inversement proportionnelle à l'évolution du bouffant. En effet, plus la pression diminue, plus la fréquence de crêpe en fait de même. Il est intéressant aussi de noter que les courbes de la pression et de la fréquence de crêpe ont exactement la même tendance avec une pente plus prononcée au début suivi d'un adoucissement. Il est donc clair que l'évolution de l'usure de la lame a un impact sur la qualité du papier produit. Il semblerait même que la qualité optimale soit atteinte à partir de 65 minutes, là où les courbes de bouffant et de fréquence de crêpe se rejoignent. À ce stade, le bouffant atteint une valeur convenable et la fréquence de crêpe n'a pas encore trop diminué pour que la douceur du papier ait chuté de façon significative. Il serait d'ailleurs intéressant de pouvoir garder constante la grandeur de la zone d'usure ou la pression effective afin d'atteindre un régime permanent en ce qui a trait à la qualité du papier.

5.4 Corrélation entre les contraintes appliquées sur la lame et son usure

L'analyse par élément finis du comportement de la lame (section 4.2.10) ainsi que les tests au profilomètre laser (section 4.2.9) et au microscope optique peuvent être reliés entre eux. En effet, il a été possible de voir, dans les tests au profilomètre laser, deux zones distinctes d'usure : une zone d'usure par frottement (biseau d'usure) et une autre créée par l'impact du papier et la déformation plastique de la lame (sillon). La figure 5.6 montre ces différentes zones à partir des tests au profilomètre laser.

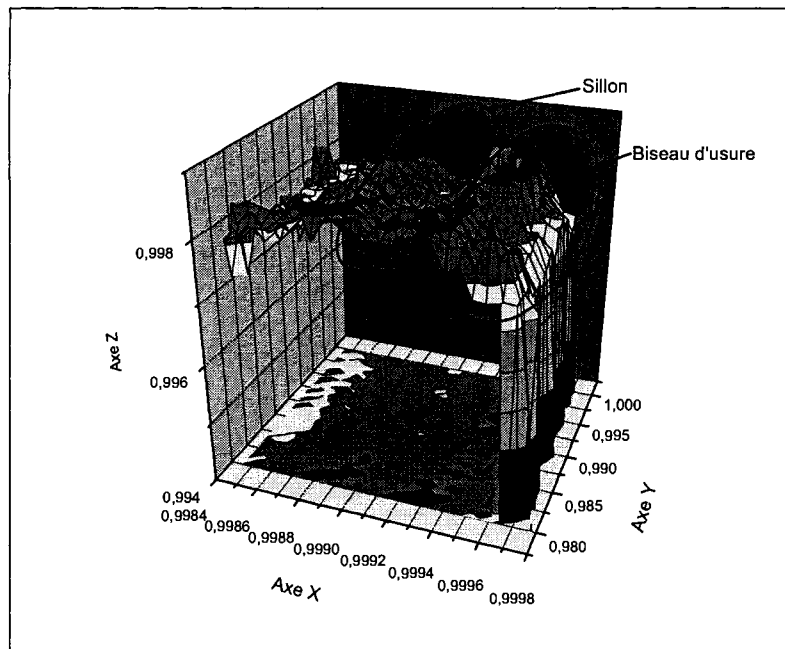


Figure 5.6 : Test au profilomètre laser montrant les 2 zones d'usure distinctes au bout de la lame

Si on examine les contraintes appliquées sur la lame grâce au modèle par éléments finis, on remarque qu'à l'emplacement exact du sillon, des contraintes très élevées sont appliquées (figure 5.7). Il est à noter que l'axe des x et l'axe des z dans le test au profilomètre correspondent respectivement à l'axe des z et à l'axe des y dans le modèle par éléments finis. Ces contraintes et l'impact du papier dans cette zone font en sorte que la lame se déforme plastiquement, créant ainsi une dépression.

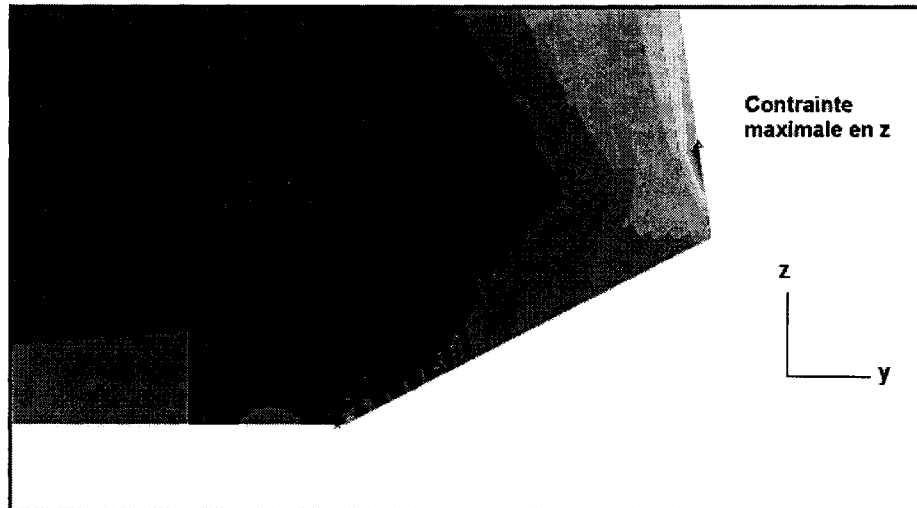


Figure 5.7 : Distribution des contraintes en bout de lame (La contrainte maximale en z est indiquée par la couleur rouge)

Il est aussi possible d'identifier ces zones au microscope optique grâce à une vue en coupe de la lame. De plus, on peut voir la crête au bout de la zone d'usure par frottement. Cette crête est aussi le résultat de la déformation plastique de la lame. La figure 5.8 montre ce phénomène.

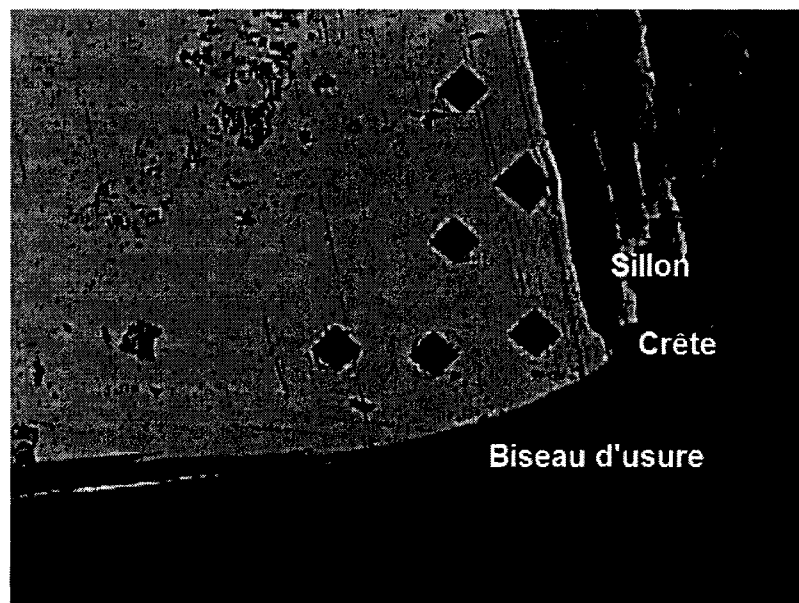


Figure 5.8 : Photo au microscope optique montrant les 2 zones d'usure distinctes au bout de la lame

Lors du frottement entre la lame et le yankee, la lame subit plusieurs étapes différentes d'usure. Tout d'abord, le frottement induit la décarburation de la lame, ce qui diminue substantiellement sa dureté. C'est à ce moment que survient alors la déformation plastique de la lame qui peut être observée par la microscopie optique et à partir du microscope électronique à balayage. Ensuite, un écrouissage de la lame fait en sorte que celle-ci se durcit graduellement. Ce phénomène se produit généralement à partir de la cinquantième minute d'utilisation. Ces phénomènes d'usure ont une influence marquée sur le procédé et ce sont eux qui expliquent les changements dans la qualité du papier en fonction du temps d'exposition à l'usure des lames.

5.5 Corrélation entre l'état des lames et la qualité du papier produit

Si on considère les lames L5CR018 et L5CR019, deux lames qui ont été utilisées la même journée, soit le 20 février 2007. En analysant les caractéristiques d'un échantillon du premier rouleau de papier crêpé avec chacune de ces lames, il est possible de faire une constatation intéressante en ce qui a trait à la largeur initiale des lames et à la qualité du papier qui en résulte. Les deux échantillons ont été pris après environ 25 minutes de crêpage. Le tableau 5.1 montre les paramètres de qualité de papier pour ces deux échantillons ainsi que la largeur des lames pour ce test.

Tableau 5.1 : Propriétés du papier normalisés et des lames pour les deux premiers échantillons tirés des lames L5CR018 et L5CR019

Lame	Largeur lame	# échantillon	Poids de base	Bouffant	Allongement	Résistance SM	Résistance ST
	cm		Échelles normalisées				
L5CR018	9,1	10H13	0,9689441	1	0,73125	0,93058568	1
L5CR019	12,2	6756	1	0,92857143	1	1	0,99354839

Bien que seulement deux heures séparent ces deux tests, on peut remarquer que la qualité du papier est très différente d'un test à l'autre pour le premier échantillon. Si on regarde de plus près la largeur des lames utilisées pour ces tests, on remarque que ce paramètre est très différent (9,1 cm pour la lame L5CR018 contre 12,3 cm pour la lame L5CR019). Afin que la lame reste collée toute de même au yankee lors du deuxième test, la base de la lame a été appuyée plus bas au niveau du docteur. La figure 5.9 montre le docteur avec la lame à l'intérieur. Il est possible de voir les appuis qui servent de support au bas de la lame. Ces appuis sont au nombre de neuf et une petite tige est insérée sur les

appuis afin d'ajuster la lame selon sa largeur. Ceci a pour effet de laisser à peu près la même quantité de lame dépasser du docteur. Ce paramètre est appelé le « stick out ». Le « stick out » est la partie de la lame qui excède du support dans lequel elle est placée lorsque appuyée sur le yankee. Cependant, puisque l'opération visant à ajuster la lame à l'aide de la tige n'est pas faite de façon très précise, ce « stick out » ne reste pas le même d'un test à l'autre. En effet, si on prend des lames dans un autre lot (les lames de différents lots n'ont pas été aiguisées le même nombre de fois donc elles n'ont pas toutes la même largeur), il y a de fortes chances que le « stick out » varie. Il varie normalement entre 5/8" et 1 1/2", soit entre 15,9 mm et 38,1 mm.

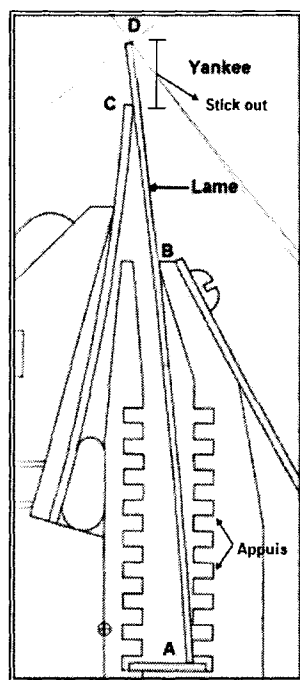


Figure 5.9 : Lame de crêpage dans son support

Le « stick out » affecte aussi l'angle de crêpage. Plus il est petit, plus l'angle de crêpage est petit et plus il est grand, plus l'angle de crêpage est grand. Un petit « stick out » induit donc un bouffant élevé et une fréquence de crêpe faible (douceur faible) tandis qu'un grand « stick out » induit un bouffant faible et une fréquence de crêpe élevée (douceur élevée) et ce, pour un angle de lame donné. Il affecte aussi l'angle formé par le biseau. Plus il est grand, plus l'angle formé par le biseau est petit. Ainsi, il fait en sorte que le biseau d'usure est différent. La figure 5.10 montre des zones d'usure avec des « stick out » différents.

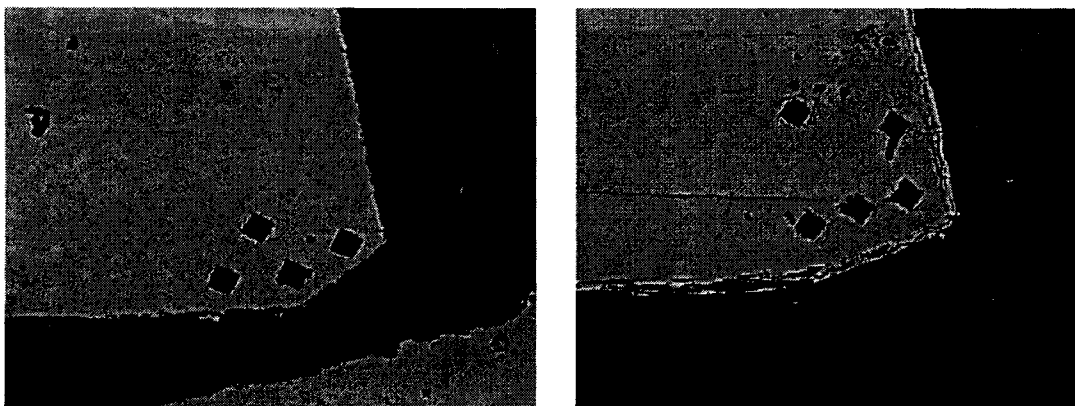


Figure 5.10 : Photos au microscope optique montrant des zones d'usure de lames avec des «stick out» différents. La lame de l'image de gauche a un «stick out» plus petit que celle de l'image de droite.

Étant donné la différence marquée dans la qualité du papier entre les lames L5CR018 et L5CR019, il est évident que l'ajustement a induit un «stick out» différent entre les deux tests. Puisque le bouffant de l'échantillon du premier rouleau de la lame L5CR018 est plus grand que celui de la lame L5CR019, il est clair que le « stick out » de la première lame était plus petit.

Il serait souhaitable de pouvoir ajuster plus précisément la position du bas de la lame de crêpage afin de garder un « stick out » constant entre deux lots de lames. Cela permettrait de garder une certaine constance dans les paramètres de qualité du papier entre deux lots de lame.

5.6 Corrélation temporelle entre l'état de la lame et la qualité du papier

Les sections 4.2.1 (dureté des lames en fonction du temps), 4.2.2 (microdureté des lames en fonction du temps), 4.2.6 (aire de la zone déformée en fonction du temps) et 4.2.7 (perte de matière en fonction du temps) ont fait ressortir des résultats qui se rejoignent. En effet, dans ces 3 tests, des phénomènes intéressants ont été remarqués après 50 minutes. Après 50 minutes de crêpage, il semble que la dureté et la microdureté aient tendance à augmenter, que l'écart entre les aires des zones déformées plastiquement au centre et aux extrémités des lames ait lui aussi tendance à augmenter et que le taux de perte de matière de la lame ait tendance à diminuer. En fait, toutes ces tendances sont

reliées entre elles d'une certaine façon et elles ont une influence directe sur le procédé et la qualité du papier. En effet, il est très intéressant de remarquer aussi, dans la section 4.1.3 que les paramètres de qualité du papier ont tendance à se stabiliser à des valeurs acceptables après 50 minutes.

Il semble donc que l'état d'usure de la lame soit idéal après 50 minutes pour produire du papier de bonne qualité. L'étude de l'état de la lame permet donc de connaître les conditions métallurgiques qui peuvent mener au bon fonctionnement du procédé de crêpage du papier.

5.7 Corrélation entre l'émission acoustique et l'usure des lames

Il est aussi possible de corréler l'émission acoustique générée par la friction entre la lame et le yankee avec l'usure que subit la lame et les variations métallurgiques induites au niveau de la pointe. Cette analyse consiste à étudier la variation de certains paramètres d'émission acoustique avec le logiciel Noesis^{MD} et à présenter des exemples d'évolution afin de définir des zones caractéristiques quant à l'évolution de ces paramètres, et de les corréler avec les différents stades d'usure de la lame. Ce travail a été effectué avec les paramètres calculés par AEWin^{MD} lors de l'acquisition des signaux en usine.

Cette section présente ainsi l'étude de trois lames avec des temps d'utilisation différents : la lame L5CR004 (50 min), la lame L5CR003 (90 min) et la lame L5CR023 (120 min). Dans chacun des cas exposés, la même disposition des graphiques des paramètres analysés a été suivie (figure 5.11).

$\text{RMS} = f(\text{Temps})$	$\text{Fréquence} = f(\text{Temps})$
$\text{RMS} = f(\text{Fréquence})$	$\text{CP 1} = f(\text{CP 2})$

Figure 5. 11 : Paramètres étudiés ; disposition des fenêtres sur Noesis^{MD}

Pour l'analyse en composantes principales, seuls les paramètres définis ci-dessous ont été conservés :

- AEwin^{MD} : Compte ; Énergie ; Amplitude ; Fréquence moyenne ; RMS ; Force du signal ; Énergie absolue

Il est à noter qu'un seul canal est présenté pour ne pas alourdir les figures.

En analysant la figure 5.12 pour la lame L5CR004 (50 min), il est possible de distinguer trois zones de comportement relié à l'usure des lames. Sur les figure 5.13 et 5.14, pour les lames L5CR003 (90 min) et L5CR023 (120 min) respectivement, il est aussi possible de distinguer ces trois zones.

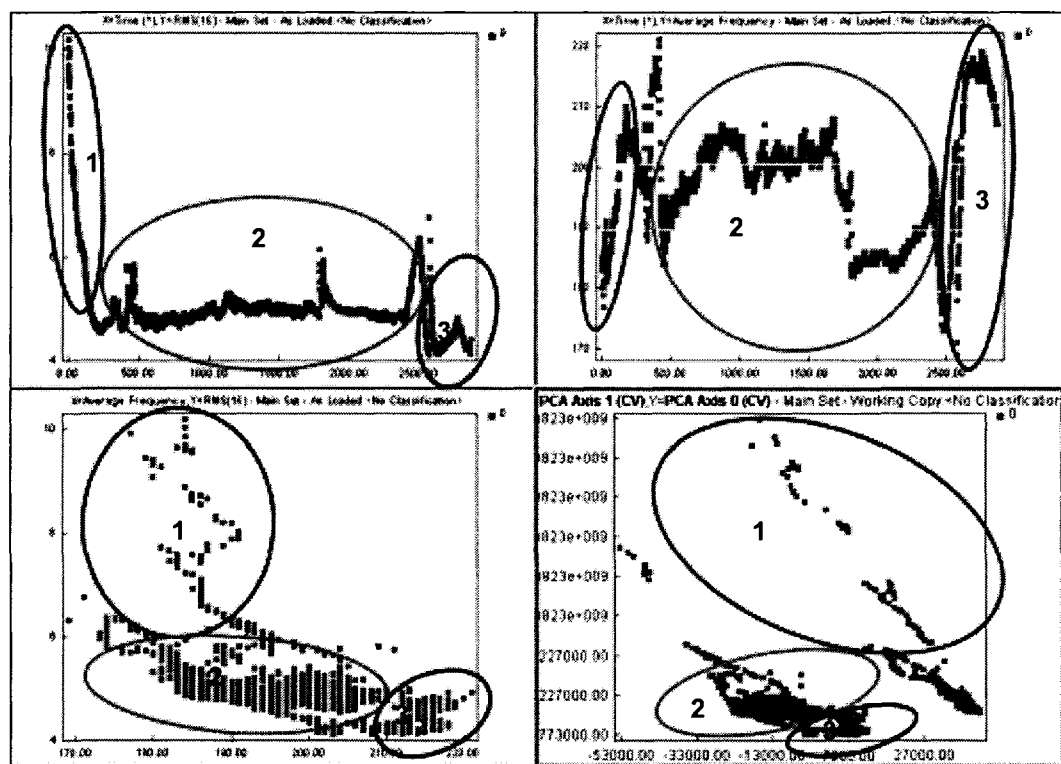


Figure 5.12 : Analyse avec Noesis^{MD} : paramètres AEWin^{MD} – Canal 1 – L5CR004

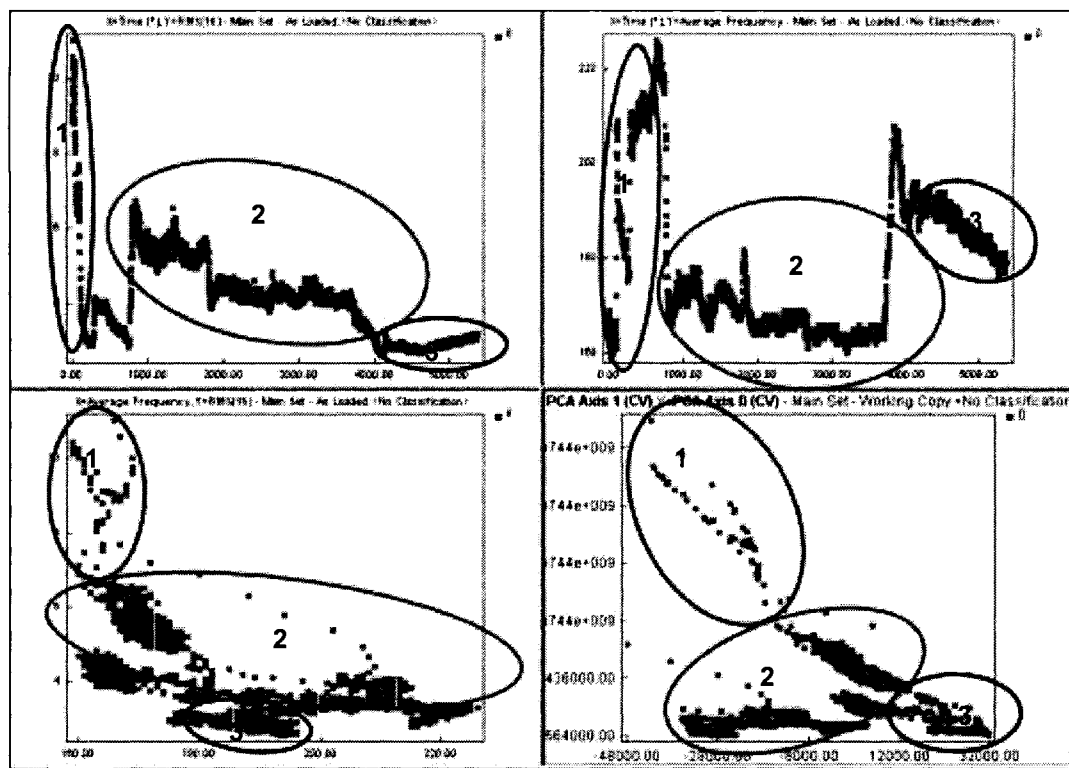


Figure 5.13 : Analyse avec Noesis^{MD} : paramètres AEWin^{MD} – Canal 1 – L5CR003

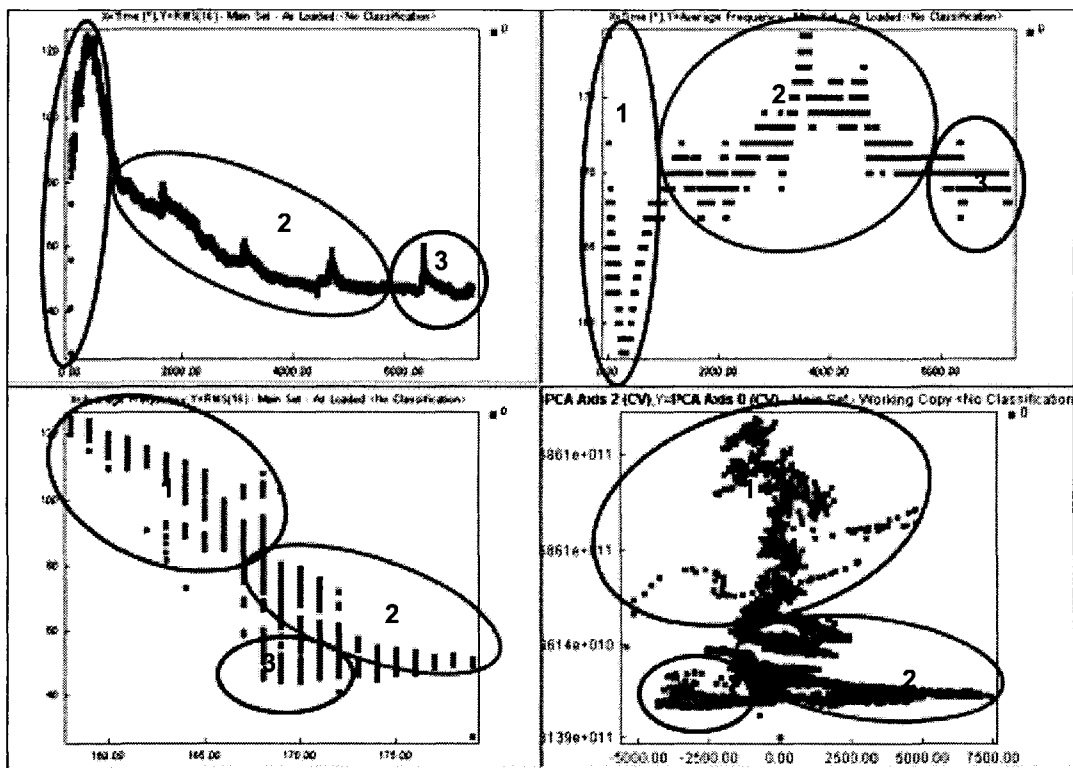


Figure 5.14 : Analyse avec Noesis^{MD} : paramètres AEWin^{MD} – Canal 2 – L5CR023

Afin d'identifier les phénomènes reliés aux comportements des lames, une interprétation détaillée par rapport à la courbe de distribution du paramètre RMS pour la lame L5CR023 est présentée et une analyse du comportement de la lame L5CR003 dans l'espace de projection RMS en fonction de la fréquence moyenne est faite.

5.7.1 Analyse de la tendance des courbes RMS en relation avec les mécanismes d'usure par friction de la lame

Afin de conclure sur la tendance des distributions des signaux d'émission acoustiques en relation avec les mécanismes sources on présente le cas de la distribution de la lame L5CR023. A titre d'exemple d'analyse la figure 5.15 représente l'évolution du niveau RMS des signaux d'émission acoustique durant la durée de vie de cette lame L5CR023.

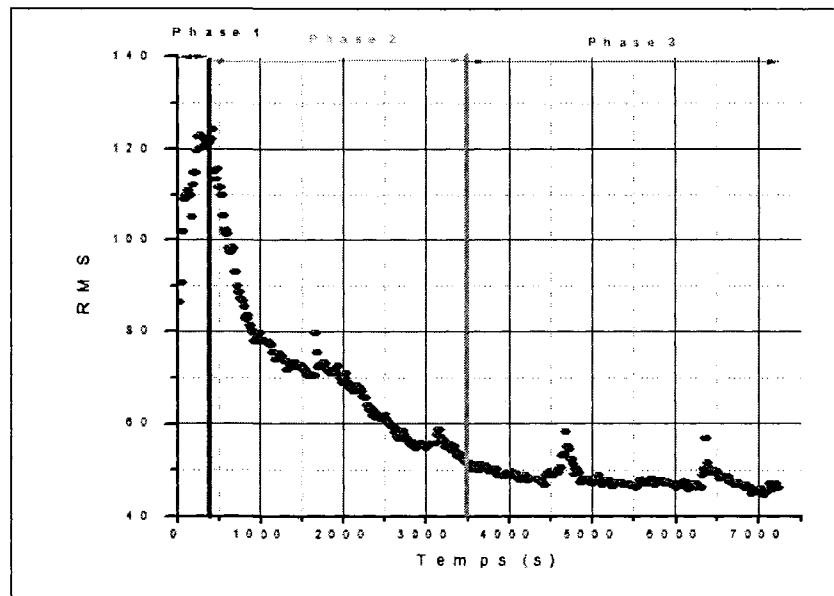


Figure 5.15 : Distribution du niveau RMS des signaux durant le crêpage par la lame L5CR023

En première approximation, on distingue trois phases, une première phase qui correspond à l'initiation des phénomènes d'usure. Durant cette phase le niveau RMS augmente d'une façon prononcée durant les 500 premières secondes après la mise en contact de la lame avec le yankee. C'est une phase où l'intensité d'émission acoustique

est très élevée. À ce stade la pointe de la lame est soumise à des frottements sévères du type labourage caractérisés par une abrasion élevée. Ce stade correspond à une élévation de la température au niveau de la pointe et il est associé à l'usure abrasive. La phase 1 correspondrait donc à la mise en contact de la lame avec le yankee, source de l'usure abrasive. L'usure abrasive diminuant ensuite progressivement pour laisser place à l'usure adhésive.

La deuxième phase, qui s'étale jusqu'à peu près 3500 secondes (ce temps est proche du moment de l'extraction du deuxième rouleau), est caractérisée initialement par une chute brutale du niveau RMS, ensuite la chute varie en diminuant avec un taux plus faible. Durant cette phase, on suppose que le matériau au niveau de la pointe subit un ramollissement après l'échauffement brutal de la lame. Comme on l'a précisé auparavant, le ramollissement correspond à la décarburation du matériau, et aux conséquences du revenu que subit la lame induisant une déformation plastique au niveau de la pointe favorisant l'usure adhésive. Ceci se traduit par des émissions acoustiques de faibles intensités. La fin de cette phase coïncide avec la chute des valeurs de dureté déjà observée durant les analyses métallurgiques des lames.

La phase 2 correspondrait donc à la poursuite de l'usure après la mise en contact de la lame avec le yankee. Les différents « pics » existant sur les figures montrant le RMS en fonction du temps sont dus aux changements de la lame de nettoyage entre chaque nouveau rouleau de papier crêpé. Lorsque cette lame est enlevée, l'excès de colle et de papier n'est pas enlevé et le frottement est alors plus intense, ce qui cause une augmentation de l'intensité des signaux d'émission acoustique.

Enfin, on remarque une dernière phase de stabilisation du niveau RMS. Durant cette phase le matériau subit un léger durcissement dû à l'écrouissage induit à la pointe par la persistance de la déformation plastique, ceci se traduit au niveau de la courbe RMS par une stabilisation de la courbe de distribution. Ce résultat coïncide avec les comportements déjà identifiés auparavant par les analyses métallurgiques et les mesures de dureté prises au niveau de la pointe de la lame.

Il est important de relever que les phases 1 et 2 concordent donc avec les deux premiers stades d'usure des matériaux soumis à la friction décrits dans la littérature [Baranov et coll., 2007] : un stade de rodage et un stade de régime « permanent ». Durant le stade de rodage, des changements se produisent, comme la diminution de la force de friction et du taux d'usure. Le deuxième stade de l'usure, le régime permanent ou plutôt « pseudo permanent » dans notre cas, est caractérisé par des valeurs en moyenne constantes pour pratiquement toutes les caractéristiques de la friction, à savoir le coefficient de friction, le taux d'usure, la température, la rugosité, etc. Durant ce stade, tous les procédés impliqués dans la friction et l'usure sont stationnaires au sens large. Le troisième stade, l'usure catastrophique, défini par des changements abrupts dans les caractéristiques de la friction n'est pas observable ici. La zone 3 correspond en fait à la généralisation de l'usure en bout de lame et à une chute du taux d'usure.

Ces différentes phases de l'usure ont un impact indéniable sur le procédé de crêpage et ainsi, sur la qualité du papier produit. Une bonne qualité de papier est généralement obtenue lorsque l'émission acoustique se retrouve dans la phase 2, soit dans la zone du régime permanent.

5.7.2 Analyse de la projection RMS-Fréquence moyenne en relation avec les mécanismes d'usure

Afin de conclure sur les projections réalisées représentées par les paramètres RMS et la fréquence moyenne en relation avec les mécanismes sources des phénomènes d'usure, on présente le cas de la projection de la lame L5CR003. A titre d'exemple d'analyse, la figure 5.16 représente la projection du niveau RMS des signaux d'émission acoustique par rapport à la fréquence moyenne des signaux pour cette lame.

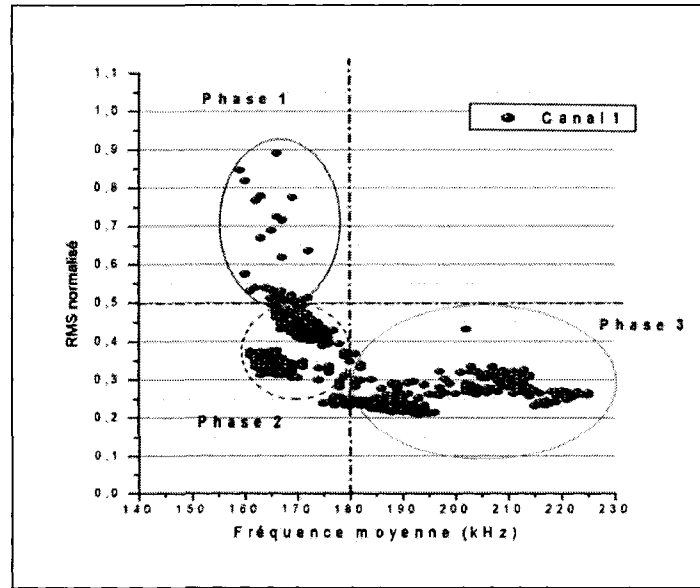


Figure 5.16 : Analyse des phases d'usure pour le canal 1 de la lame L5CR003

On distingue trois phases, une première phase qui correspond à l'initiation des phénomènes d'usure. Durant cette phase les signaux ont un niveau RMS élevé (0,5 à 1 dans l'échelle normalisée) et des fréquences moyennes comprises entre 155 kHz et 175 kHz. Ce groupe de signaux caractérise la phase 1 qui est une phase d'initiation de l'usure de la lame lorsque celle-ci est mise en contact avec le yankee au début du processus de crêpage. On identifie cette phase aux frottements sévères du type labourage caractérisés par une abrasion élevée. Encore une fois ce stade correspond à l'élévation de la température au niveau de la pointe de la lame. La deuxième phase, regroupe des signaux ayant un niveau RMS moyen (0,3 à 0,5 dans l'échelle normalisée) et des fréquences variant de 160 kHz à 180 kHz. Le groupe des signaux de cette phase témoigne de la présence d'un mécanisme d'usure générant des niveaux RMS modérés qui doivent être reliés aux évolutions des mécanismes d'usure adhésive favorisant la déformation plastique de la pointe de la lame et au ramollissement du matériau.

Enfin une dernière phase qui regroupe des signaux ayant un niveau RMS faible (0,2 et 0,3 dans l'échelle normalisée) et des fréquences moyennes s'étalant approximativement de 180 kHz à 220 kHz. Cette phase devra correspondre à la stabilisation des phénomènes d'usure due au polissage induit au niveau de la pointe de la lame et au léger durcissement observé auparavant causé par l'écrouissage des lames.

Cette analyse est adaptée pour la lame L5CR003, toutefois les projections réalisées sur les autres lames devront suivre ce raisonnement dans des cas idéaux d'essais, seulement chaque lame a ses propres caractéristiques d'usure. Les conditions de frottement lame-yankee varient d'une lame à l'autre dépendant de l'environnement de la lame, de la variation des températures atteintes et des conditions géométriques des lames durant le crêpage, de la distribution de la pression de contact le long des lames, du nombre d'aiguisage, etc. Par conséquent, ces résultats montrent que les lames ont des comportements différents qui favorisent l'obtention de différents grades de qualité tel que mesurés dans les chapitres précédents.

5.8 Corrélation entre l'émission acoustique et la qualité du papier

Il est possible de faire des liens entre l'émission acoustique générée par le frottement entre la lame et le yankee et la qualité du papier produit. Les figures 5.17 à 5.18 montrent l'évolution de la qualité du papier (bouffant, fréquence de crêpe et BLAH) et du paramètre RMS en fonction du temps pour deux lames typiques, L5CR003 et L5CR023.

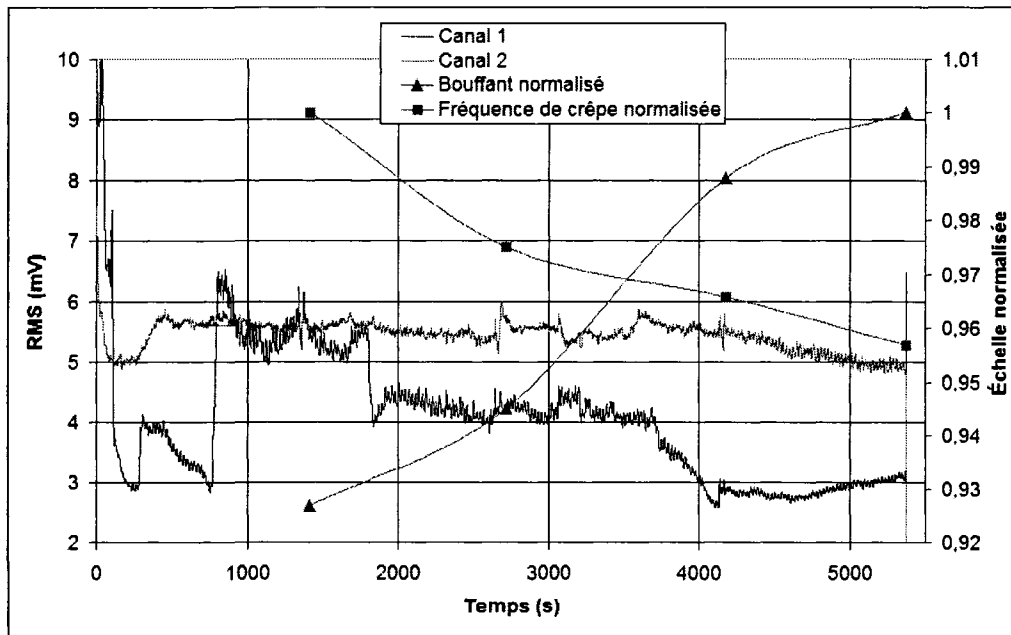


Figure 5.17 : Évolution du bouffant, de la fréquence de crêpe et du paramètre d'émission acoustique RMS en fonction du temps pour la lame L5CR003

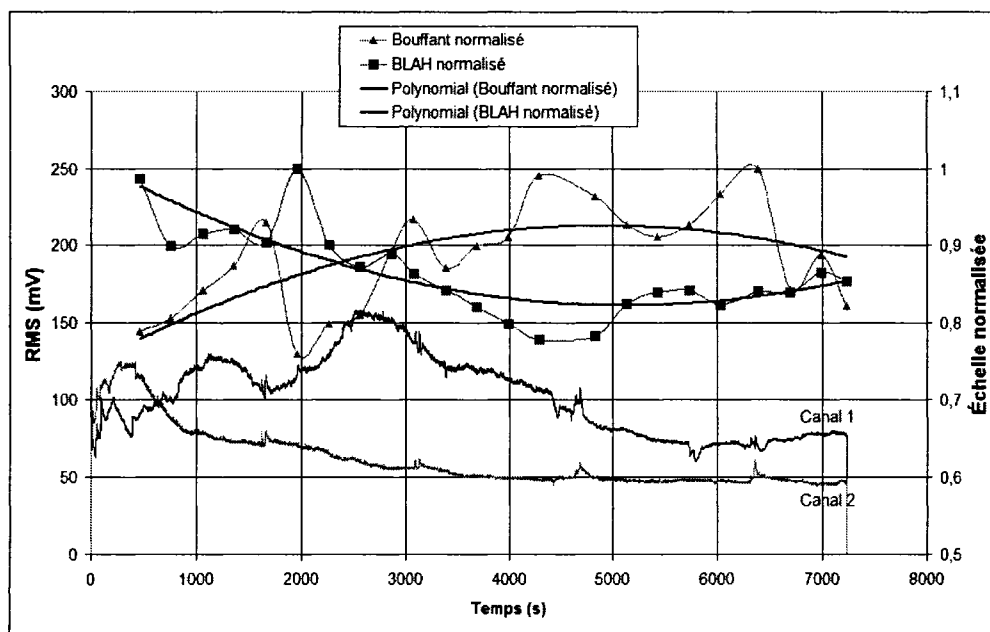


Figure 5.18 : Évolution du bouffant, du BLAH et du paramètre d'émission acoustique de la lame L5CR023

Les courbes montrent une augmentation du bouffant avec la durée d'utilisation de la lame et une tendance inversée pour ce qui est de la fréquence de crêpe et du BLAH. Le niveau RMS normalisé tend quant à lui à diminuer tout au long du test. Cela permet de constater que le niveau RMS, qui est un indicateur de la sévérité de l'usure, est inversement proportionnel avec le bouffant et proportionnel à la fréquence de crêpe et au BLAH. Ainsi, il est possible de constater que moins le taux d'usure est sévère, plus la qualité du papier est bonne. Cependant, cette relation n'est pas vraie sur toute la durée de vie des lames puisque vers les derniers rouleaux, la qualité du papier a généralement tendance à diminuer. On peut remarquer ce fait sur la figure 5.18 où l'on voit que le bouffant tend à diminuer vers la fin du test. Il est aussi intéressant de noter que pour la lame L5CR003, le bouffant est encore dans son ascension lorsque la lame est changée. Ainsi, il aurait peut-être été avantageux de laisser cette lame en place plus longtemps puisque la qualité du papier continuait de progresser.

À ce stade, il est aussi possible de comparer l'évolution du bouffant avec celle de l'énergie cumulative (aire sous la courbe RMS) calculée à partir du niveau RMS minimal de chaque courbe. Les figures 5.19 à 5.22 présentent ces résultats pour quelques lames. Ces courbes montrent des tendances relativement similaires pour l'évolution du bouffant et celle de l'énergie cumulative des signaux d'émission acoustique. Il est possible de constater que la stabilisation du bouffant à des niveaux élevés correspond normalement à

une stabilisation de l'émission acoustique et donc à une stabilisation du taux d'usure de la lame. Ainsi, on pourrait avancer que la stabilité du taux d'usure des lames est un gage de stabilité dans la production de papier de bonne qualité.

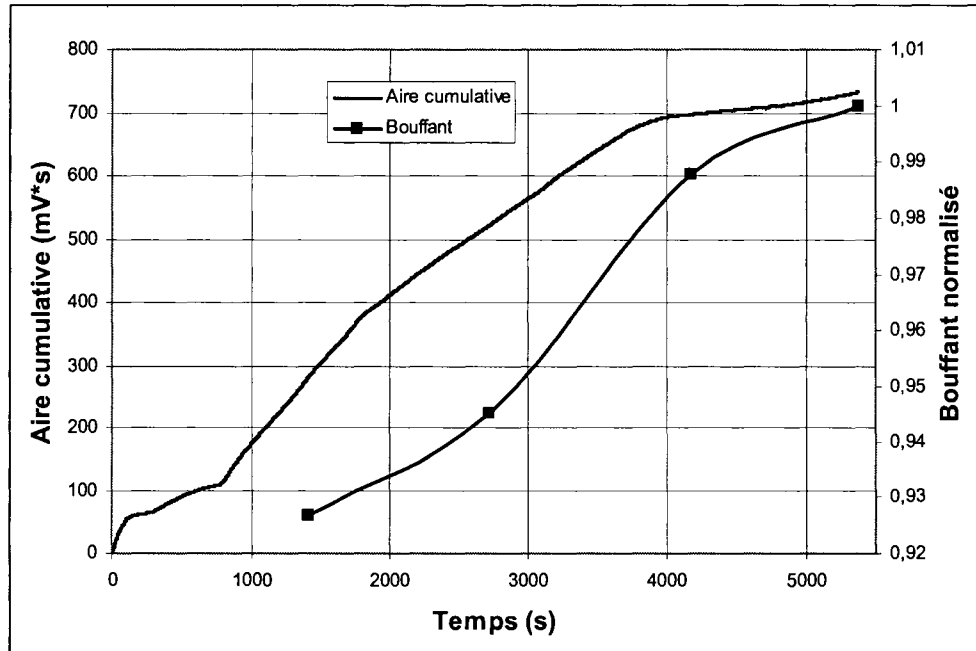


Figure 5.19 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR003

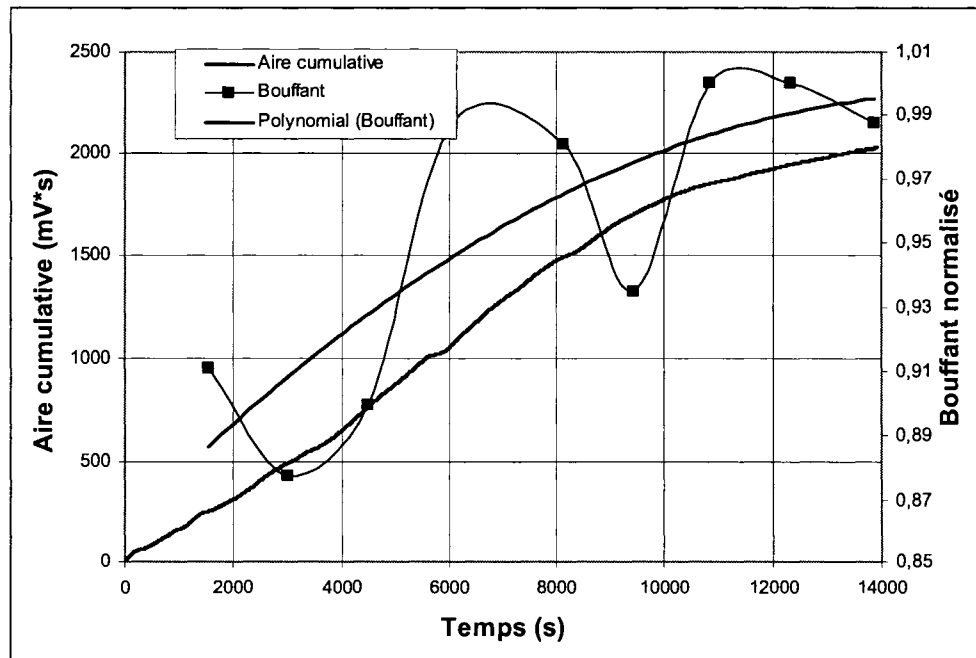


Figure 5.20 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR019

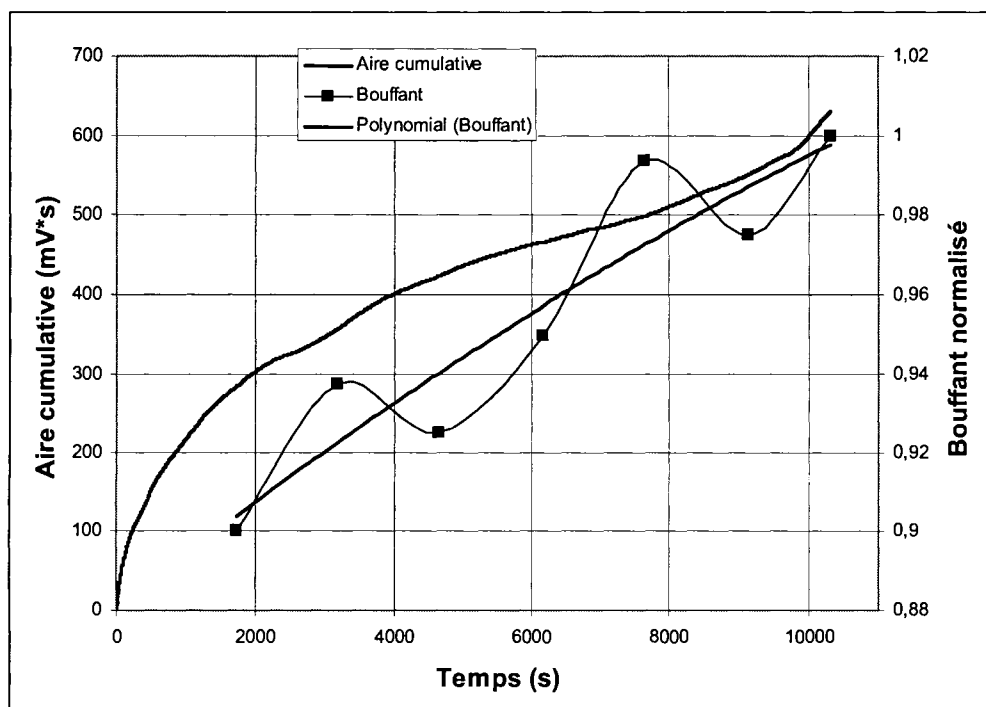


Figure 5.21 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR022

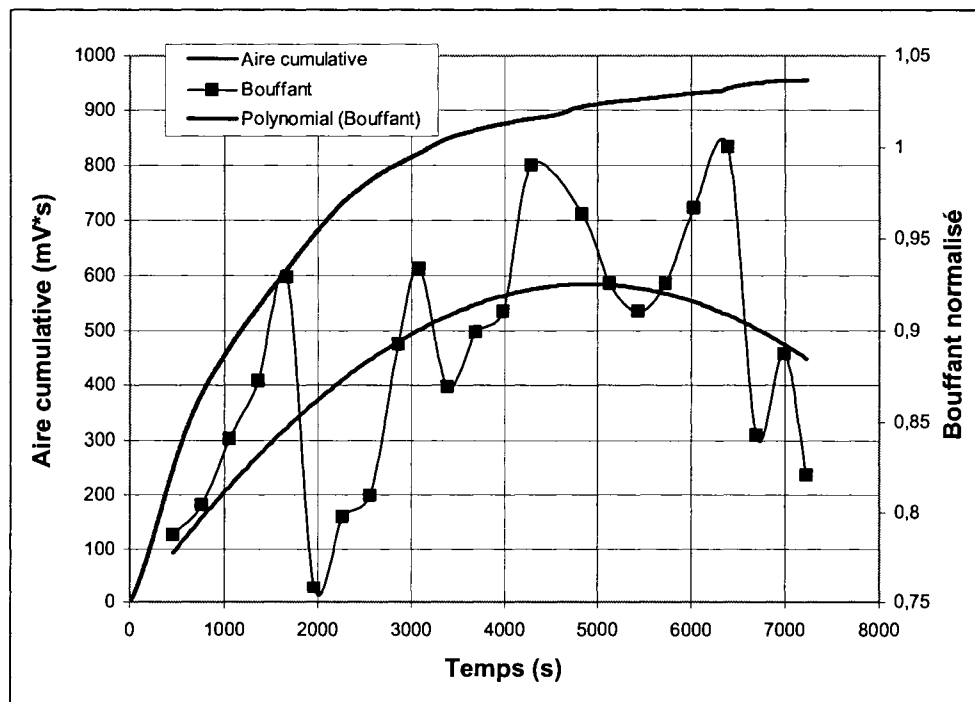


Figure 5.22 : Comparaison entre l'évolution de l'aire cumulative sous la courbe du paramètre RMS et du bouffant pour la lame L5CR023

5.9 Méthode de fusion des données d'émission acoustique et de qualité de papier

Afin de pouvoir réaliser une fusion des données d'émission acoustique et de qualité de papier, on se propose de réaliser une projection dans un plan de chacune des lames en termes d'émissivité des signaux d'émission acoustique en fonction du paramètre de qualité du papier défini par le bouffant. Ainsi, avec l'aire totale sous la courbe du niveau RMS (voir section 5.8) et la fréquence moyenne, il est aussi possible de représenter chaque test, autrement dit chaque lame, par un point ayant comme abscisse l'aire totale sous la courbe RMS divisée par le temps et comme ordonnée la fréquence moyenne du test. Le tableau 5.2 montre les résultats des aires mesurées et des fréquences moyennes correspondantes pour chaque lame testées pour le canal 1. La figure 5.23 montre quant à elle la projection de l'aire totale sous la courbe du RMS et de la fréquence moyenne pour toutes les lames testées avec la valeur du bouffant moyen correspondant au test.

Tableau 5.2 : Données sur l'aire sous la courbe du RMS et de la fréquence moyenne pour chaque test effectué pour le canal 1

Lame	Aire RMS (mV*s)	Durée de vie de la lame (s)	Aire RMS/Durée de vie (mV)	Fréquence moyenne (kHz)
L5CR003 Canal 1	732,61	5370	0,136426443	178,53
L5CR004 Canal 1	244,87	2970	0,082447811	197,73
L5CR006 Canal 1	1111,7	4689	0,237086799	162,12
L5CR008 Canal 1	184,21	1260	0,146198413	191,31
L5CR017 Canal 1	58,85	1504,8	0,039108187	172,43
L5CR018 Canal 1	278,41	3488,4	0,079810228	157,38
L5CR019 Canal 1	1042,17	13928,4	0,074823382	175
L5CR020 Canal 1	1391,45	7630,2	0,182360882	165,08
L5CR022 Canal 1	1487,65	10309,2	0,144303147	161,53
L5CR023 Canal 1	1921,02	7237,8	0,265414905	158,98
L5CR024 Canal 1	1216,72	6024,6	0,201958636	158,73

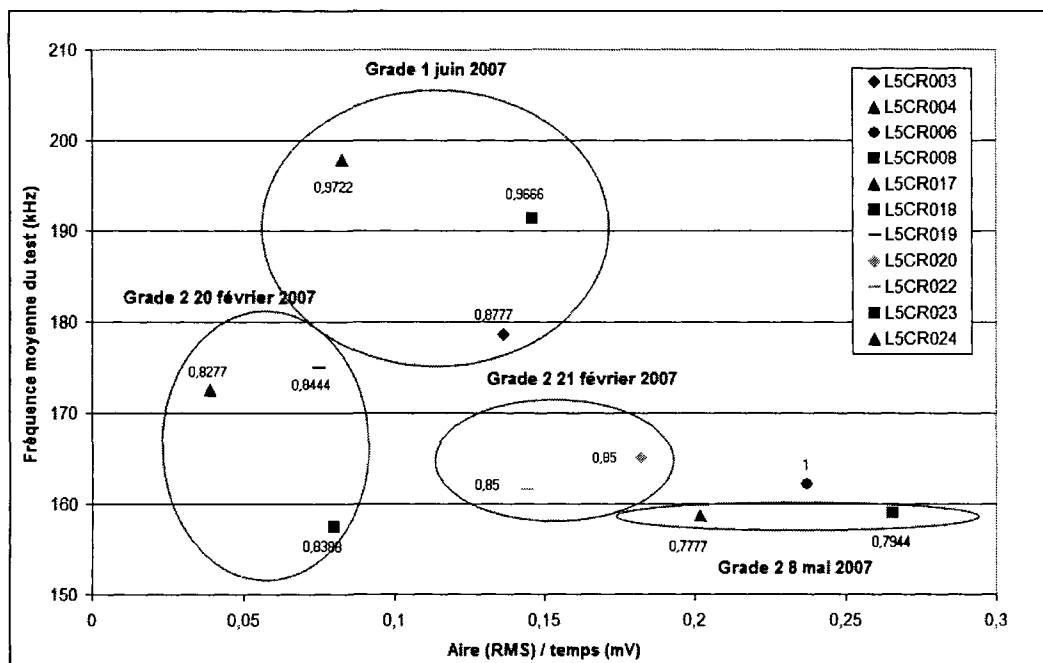


Figure 5.23 : Classement des différents tests d'émission acoustique (Canal 1) selon la qualité du papier produit et la date du test

La réduction des données permet de réaliser une projection dans un plan où chaque point représente une lame testée. Cette projection a l'avantage de comparer toutes les lames en relation avec les valeurs de qualité représentées par les valeurs normalisées du bouffant.

On a identifié quatre groupes de lame bien séparés dans l'espace de projection. Ainsi toutes les lames testées le 20 février 2007 du grade de papier 2, se retrouvent groupées dans une classe définie par des fréquences comprises entre 157 kHz et 175 kHz sur l'axe des fréquences et une énergie totale comprise entre 0.039 et 0.07, cette classe a des valeurs normalisées de bouffant variant de 0,8277 à 0,8444. Les lames testées le 21 février 2007, du grade de papier 2 se retrouvent avec des valeurs de fréquences comprises entre 161 kHz et 165 kHz et des valeurs d'énergie comprises entre 0,14 et 0,18, la valeur normalisée du bouffant est de 0,85. Un dernier groupe du grade de papier 2 présentant des valeurs normalisées faibles de bouffant comprises entre 0,7777 et 0,7944, ont été testées le 8 mai 2007. Ce groupe a une fréquence moyenne de 158 kHz et des énergies variant de 0.20 à 0.26. Enfin, le groupe de lame qui a donné les valeurs les plus élevées en terme de qualité, soit des valeurs normalisées de bouffant variant de 0,8777 à 0,9722, a des fréquences moyennes comprises entre 178 kHz et 197 kHz et des énergies comprises entre 0,082 et 0,13.

En conclusion les valeurs les plus faibles du bouffant correspondent à des fréquences moyennes faibles et à des énergies de signaux élevées. C'est le cas de l'essai sur le grade de papier 2 du 8 mai 2007. On suppose que durant cette période l'usure des lames a été sévère. Les valeurs du bouffant les plus élevées sont obtenues pour des fréquences moyennes élevées et des énergies d'usure modérées. C'est le cas de l'essai du mois de juin 2006 sur le grade de papier 1.

5.10 Application de la technique des réseaux de neurones aux données d'émission acoustique et de qualité du papier

Le but poursuivi par les tests d'émission acoustique est de pouvoir déterminer la qualité du papier seulement en suivant l'évolution des paramètres d'émission acoustique fournis par le frottement de la lame sur le yankee. Ainsi, il serait possible de savoir à quel moment changer la lame suivant les paramètres d'émission acoustique et la qualité du papier qui lui est reliée. La technique des réseaux de neurones permet ce genre de prévision avec une certaine précision.

5.10.1 Introduction aux réseaux de neurones

Les réseaux de neurones peuvent être définis par des modèles informatiques avec la capacité d'adapter, d'apprendre, de généraliser, de grouper ou d'organiser les données et dont l'opération est basée sur le traitement parallèle [Kröse et coll., 2006]. Il est possible d'entraîner un réseau de neurones à accomplir une fonction particulière en ajustant les valeurs des connexions (pondérations) entre les éléments. Habituellement, les réseaux de neurones sont entraînés afin qu'une entrée particulière mène à une sortie spécifique. Une telle situation est représentée plus bas sur la figure 5.24. Ici, le réseau est ajusté en se servant de la comparaison entre la sortie et la cible jusqu'à ce que le réseau arrive à faire correspondre la sortie avec la cible. Normalement, plusieurs de ces paires entrée/cible sont nécessaires afin d'entraîner un réseau.

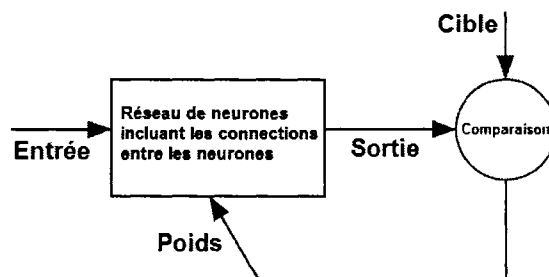


Figure 5.24 : Schéma d'un réseau de neurones

Les réseaux de neurones sont entraînés pour accomplir des fonctions complexes dans des domaines variés incluant la reconnaissance de formes, l'identification, la classification et le contrôle de systèmes. Aujourd'hui, les réseaux de neurones peuvent être entraînés pour résoudre des problèmes difficiles à résoudre pour les ordinateurs conventionnels et l'être humain. Deux ou plusieurs de ces neurones peuvent être combinés dans une couche et un réseau particulier peut contenir une ou plusieurs de ces couches. Pour l'application choisie, le perceptron multicouche est utilisée car ce type de réseau est très bien adapté pour faire la modélisation de fonctions. La théorie relative aux réseaux de neurones et au perceptron multicouche est présentée à l'annexe IV.

5.10.2 Application des réseaux de neurones

Comme il a été mentionné plus tôt dans ce mémoire, l'application choisie consiste à construire un réseau de neurones qui peut déterminer l'évolution d'un paramètre de qualité de papier à partir de plusieurs paramètres d'émission acoustique calculés à partir des signaux enregistrés lors du procédé de crêpage. Le logiciel Peltarion Synapse^{MD} est utilisé pour fabriquer et utiliser le réseau de neurones. Quatre modes distincts existent dans le logiciel : le mode Prétraitement (*Preprocessing*), le mode Design, le mode Apprentissage (*Training*) et le mode Post-traitement (*Postprocessing*). Le mode Prétraitement sert à charger les données, à les étudier, à les changer et à les modifier. Le mode Design sert quant à lui à fabriquer le réseau de neurone qui sera utilisé pour l'application. Le mode Entraînement est utilisé pour adapter le système et est visuellement similaire au mode Design. Pour ce qui est du mode Post-traitement, il est dédié à l'analyse d'un système déjà formé et à la préparation d'un tel système pour l'utilisation finale. Dans ce mode, il est possible de tester le système et de prendre des mesures pour avoir une idée de la façon dont il performe et de voir s'il répond aux

exigences. Les paragraphes qui suivent développent chacune des étapes qui ont été suivies dans les trois premiers modes afin de fabriquer et entraîner le réseau de neurones.

i. Mode Prétraitement

Deux bases de données ont été créées à partir des données recueillies lors du procédé de crêpage. La première base de données (entrée) consiste en une matrice de 5 colonnes comportant les données de l'évolution de 4 paramètres d'émission acoustique en fonction du temps pour une lame de crêpage. Les paramètres d'émission acoustique choisis sont le compte, la fréquence moyenne, le RMS et l'énergie absolue. Ces paramètres ont été choisis car ils sont très représentatifs des phénomènes d'usure qui se produisent en bout de lame. La deuxième base de données (cible) donne l'évolution du paramètre bouffant du papier. Après avoir bâti les bases de données, celles-ci sont chargées à l'intérieur du logiciel. En fait, en insérant les données d'émission acoustique à l'entrée du réseau de neurones, le but est de retrouver à sa sortie l'évolution du paramètre de qualité du papier qui est ici le bouffant.

ii. Mode Design

Le réseau de neurones choisi pour faire ce travail est un perceptron multicouche, un type de réseau capable de faire l'approximation de fonctions non-linéaires. La figure 5.25 montre l'architecture du réseau de neurones utilisé durant son design.

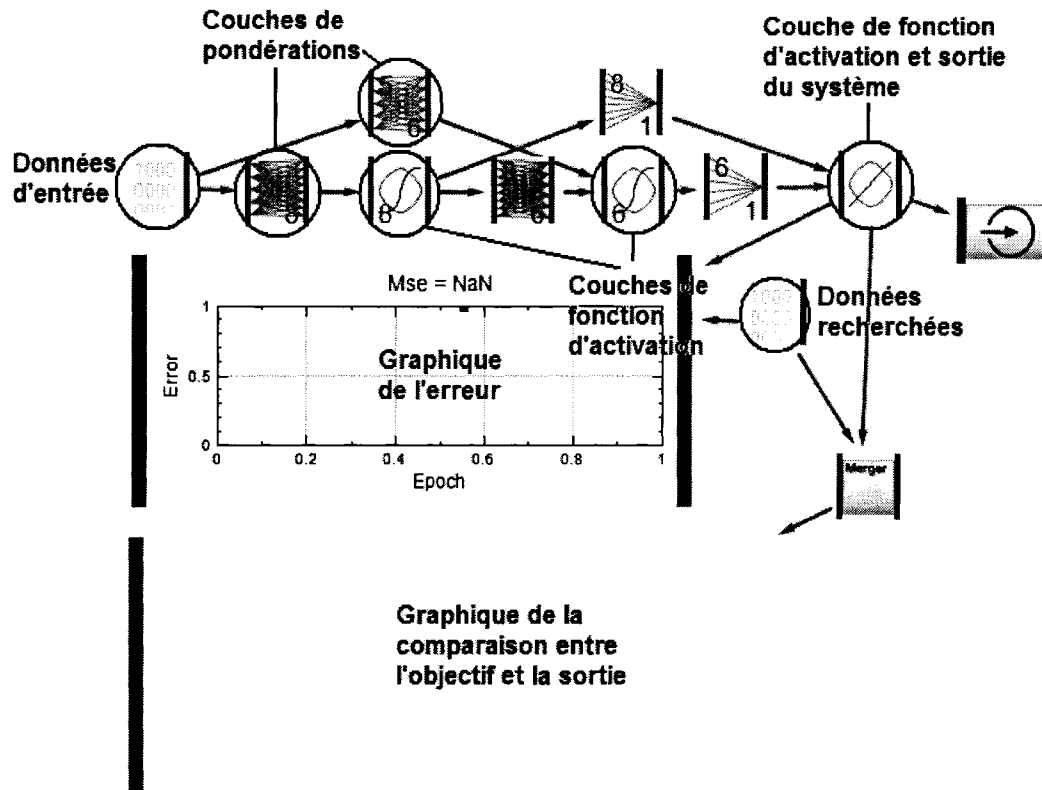


Figure 5.25 : Schéma de l'interface de design du logiciel Peltarion Synapse^{MD} pour le réseau utilisé

Le réseau présenté sur la figure 5.25 est un réseau perceptron multicouche à 2 couches avec des connexions latérales qui permettent au système de contourner les couches du milieu. Ce contournement donne au réseau un peu plus de flexibilité en lui donnant un chemin parallèle pour le signal. Ce type de réseau est appelé *Generalized two layers* dans le logiciel Peltarion Synapse^{MD}. Sur cette dernière figure, les flèches représentent les connexions entre les différentes couches. Le nombre d'entrées et de sorties des couches de pondération peut être déterminé par l'utilisateur du logiciel. Selon la performance du réseau, ce nombre peut être changé. Ici, par exemple, cinq entrées (correspondant aux données de la matrice d'entrée) et 8 sorties ont été choisies pour la première couche de pondération. Pour ce qui est de l'affichage, deux graphiques sont présentés, le premier représente un graphique de l'erreur (la différence) entre l'entrée et la sortie en fonction du nombre d'itérations. La formule utilisée pour faire le calcul de l'erreur est la suivante :

$$\bar{o} = \sum f(\bar{i}_1, \bar{i}_2) \quad (5.1)$$

L'autre graphique montre le résultat obtenu par la sortie du réseau de neurone et le compare avec l'objectif.

iii. Mode Apprentissage

Dans ce mode, il est possible de régler deux paramètres très importants qui déterminent à quel point le système sera performant. Le nombre maximal d'itérations que le système va accomplir avant de s'arrêter (*max epoch*) et le nombre d'échantillons sur lesquels les calculs d'une mise à jour des paramètres du système adaptatif est fondée (*batch length*). Quand un système fait son apprentissage, il est possible de faire le choix du nombre d'échantillons à prendre en compte pour chaque mise à jour des paramètres du système. Un plus grand nombre d'échantillons améliore la fiabilité des statistiques utilisées dans les calculs et donne souvent une meilleure convergence. Un plus petit nombre d'échantillons résulte en plus de mises à jour par itération et peut parfois compenser pour le manque de précision. Le choix optimal dépend grandement du choix de la mise à jour des règles et de la complexité du problème.

Pour l'application, le nombre d'itérations a été fixé à 1000 tandis que le nombre d'échantillons à prendre en compte est déterminé par les dimensions de la matrice d'entrée. En fait, tous les échantillons de la matrice sont présentés en même temps. Les matrices d'entrée et de sortie qui servent à entraîner le réseau sont tirées des résultats de la lame L5CR023 tandis que les matrices d'entrée et de sortie qui servent à tester le réseau sont tirées des résultats de la lame L5CR019.

5.10.3 Résultats et analyse

Dans le cadre du cours GMC-705, il a été possible de construire un réseau de neurones capable de déterminer l'évolution d'un paramètre de qualité de papier à partir de plusieurs paramètres d'émission acoustique calculés à partir des signaux enregistrés lors du procédé de crêpage.

i. Bases de données pour l'apprentissage et la validation

La base de données qui a servi à entraîner le réseau est tirée des résultats recueillis lors des tests de papier et d'émission acoustique sur la lame L5CR023. Les figures 5.26 et 5.27 montrent l'évolution de deux des quatre paramètres d'émission acoustique en fonction du temps pour cette lame.

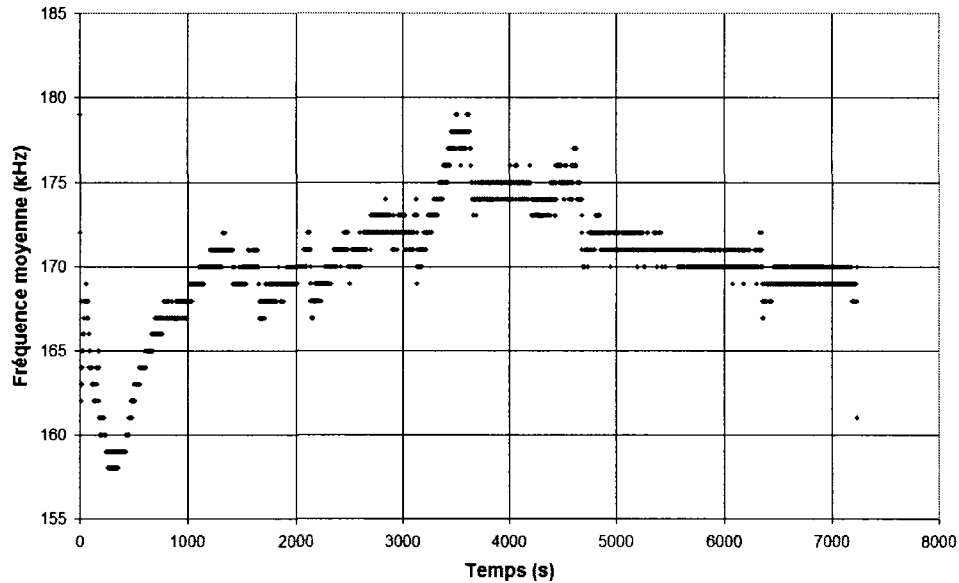


Figure 5.26 : Évolution de la fréquence moyenne des signaux d'émission acoustique en fonction du temps pour la lame L5CR023

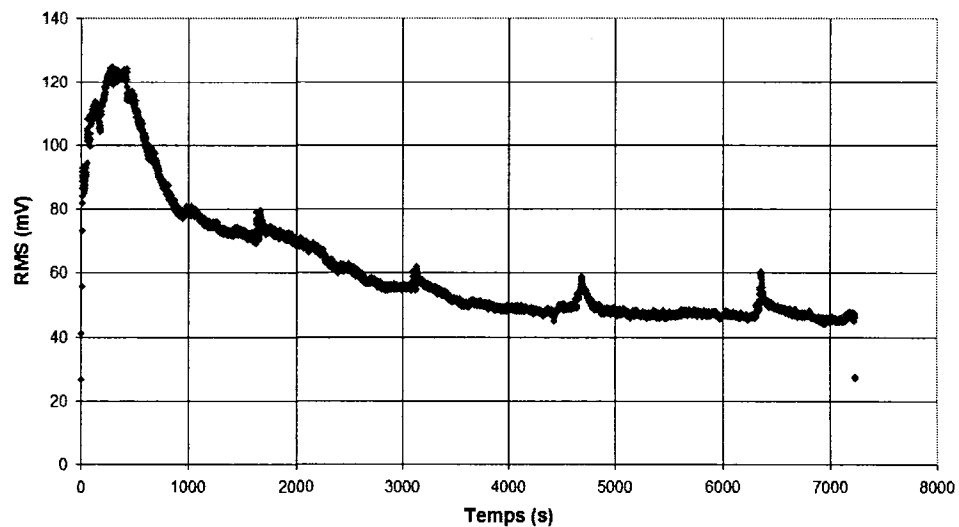


Figure 5.27 : Évolution du niveau RMS des signaux d'émission acoustique en fonction du temps pour la lame L5CR023

Pour ce qui est de l'évolution de la qualité du papier en fonction de la durée de vie de la lame, elle est représentée par le paramètre bouffant qui est en fait l'épaisseur du papier produit. La figure 5.28 montre cette évolution en fonction du temps.

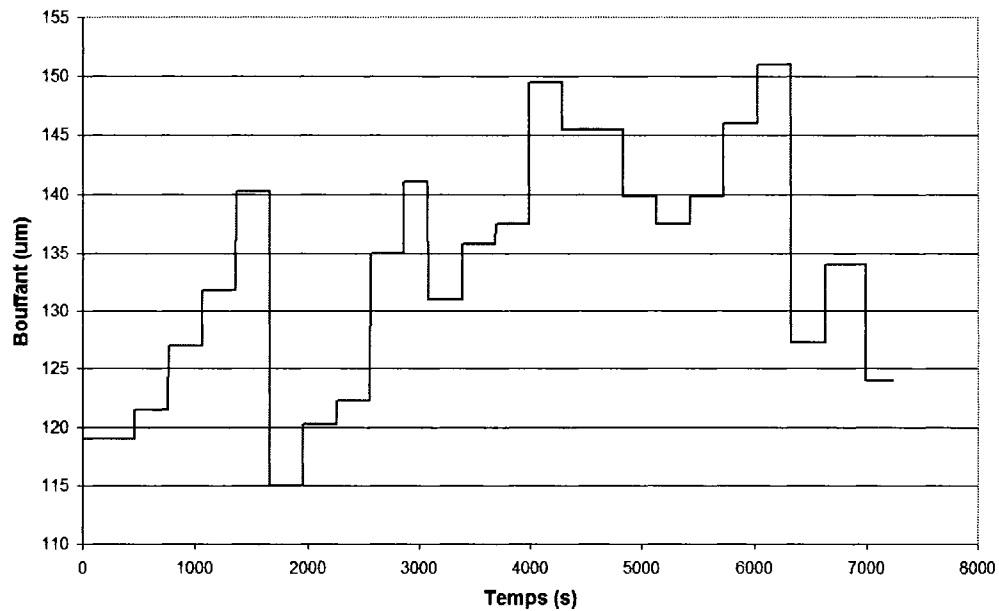


Figure 5.28 : Évolution du bouffant du papier produit en fonction du temps pour la lame L5CR023

Pour ce qui est de la validation, la base de données utilisée est tirée des résultats de la lame L5CR019 et elle possède exactement la même forme que celle de la lame L5CR023.

ii. Apprentissage du réseau de neurones

Pour ce qui est de l'apprentissage, le réseau de neurones s'adapte relativement bien pour modéliser la fonction. La figure 5.29 montre le résultat de la sortie du réseau de neurones en comparaison avec la cible pour la lame L5CR023.

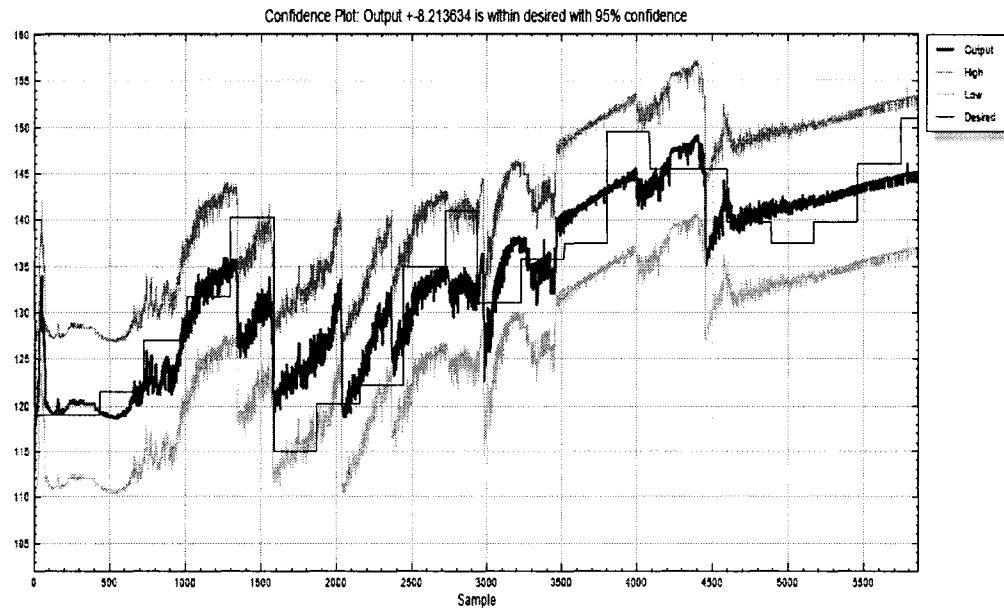


Figure 5. 29 : Comparaison entre la sortie et la cible pour la lame L5CR023 pour l'apprentissage du réseau de neurones

Sur cette figure, on peut remarquer que la sortie du réseau de neurones suit relativement bien l'évolution du bouffant pour cette lame. En effet, 95 % du temps la fonction approximée se retrouve à l'intérieur de plus ou moins 8,213634 μm . De plus, on remarque que la tendance générale de la courbe est respectée. La figure 5.30 montre quant à elle la distribution de l'erreur par rapport à la cible pour le bouffant de cette lame.

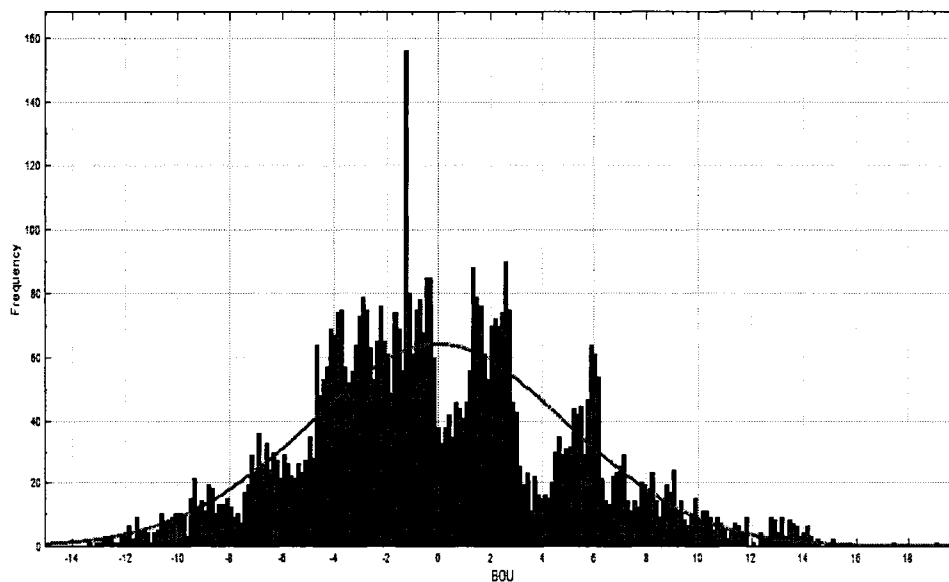


Figure 5.30 : Graphique de la distribution de l'erreur pour la sortie du réseau de neurones en mode apprentissage (Lame L5CR023)

On peut voir sur cette dernière figure que la majorité des erreurs ne dépassent pas 5 à 6 μm de différence entre la sortie et la cible. Il est aussi possible de remarquer que les paramètres les plus sensibles à l'évolution du bouffant sont le temps, la fréquence moyenne et l'énergie absolue.

iii. Validation du réseau de neurones

En ce qui concerne la validation du réseau de neurones, les données de la lame L5CR019 sont utilisées. La figure 5.31 montre le résultat de la sortie du réseau de neurones en comparaison avec la cible pour la lame L5CR019.

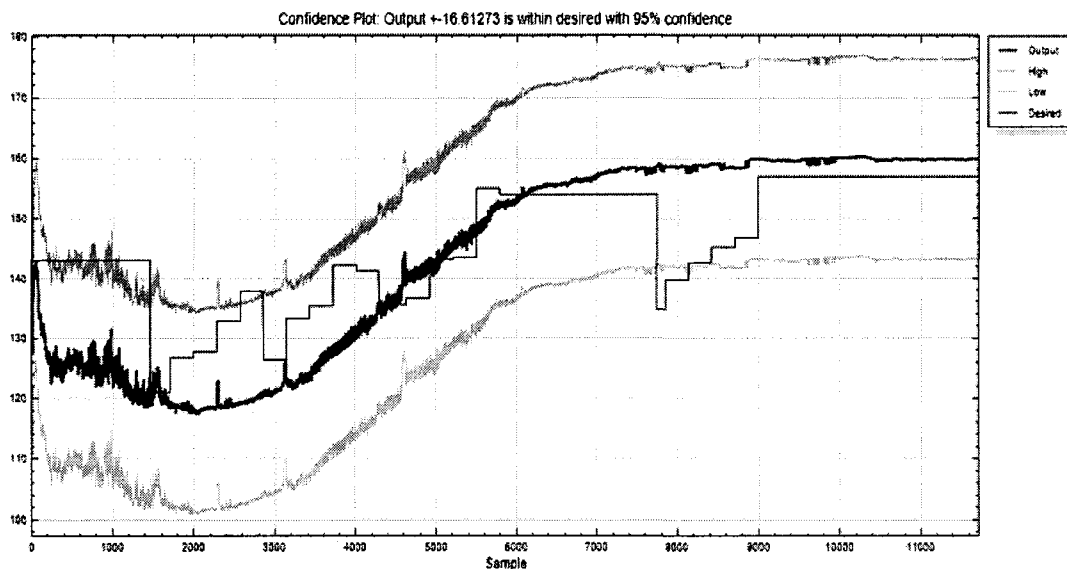


Figure 5.31 : Comparaison entre la sortie et la cible pour la lame L5CR019 pour la validation du réseau de neurones

Sur cette figure, on peut remarquer que la sortie du réseau de neurones suit encore une fois relativement bien l'évolution du bouffant pour cette lame. En effet, 95 % du temps la fonction approximée se retrouve à l'intérieur de plus ou moins 16,61273 μm . Encore une fois, on peut remarquer ici que la tendance générale de la courbe est respectée. La figure 5.32 montre quant à elle la distribution de l'erreur par rapport à la cible pour le bouffant de cette lame.

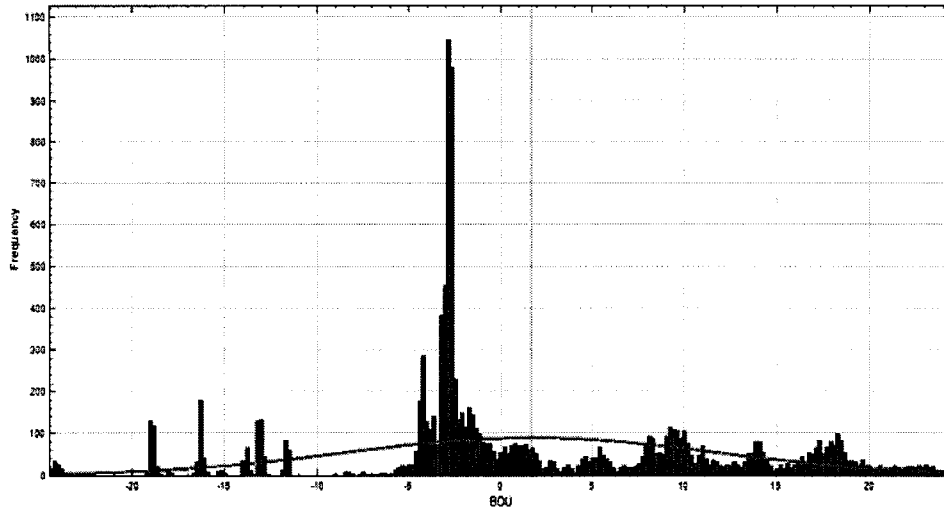


Figure 5.32 : Graphique de la distribution de l'erreur pour la sortie du réseau de neurones en mode apprentissage (Lame L5CR023)

On peut voir sur cette dernière figure que la majorité des erreurs ne dépassent pas 10 μm de différence entre la sortie et la cible.

Somme toute, les résultats de la validation montrent que le réseau parvient à bien modéliser l'évolution du bouffant à partir des données d'émission acoustique. Cependant, quelques solutions restent quand même à envisager afin d'améliorer le réseau. Premièrement, il aurait été intéressant de disposer de plus de données pour faire l'apprentissage du réseau. Il aurait fallu avoir plus de tests sur les lames avec des données de qualité de papier afin que le réseau soit mieux adapté. En second lieu, l'introduction de plus de paramètres d'émission acoustique à l'entrée du réseau de neurones aurait permis à celui-ci d'être plus efficace dans la modélisation de l'évolution du bouffant en fonction du temps. Finalement, il aurait été intéressant aussi d'introduire en entrée du réseau les données de changement de rouleau puisque l'on observe une chute du bouffant lorsque ce phénomène se produit. Lorsqu'un rouleau est changé, normalement à toutes les 25 minutes, on observe une chute marquée du bouffant. L'ajout de cette information en entrée du réseau améliorerait sûrement la sortie du réseau autant en apprentissage qu'en validation. Le réseau serait ainsi plus en mesure de représenter les chutes brusques de bouffant.

CONCLUSION

La batterie de tests effectués au cours de cette maîtrise a permis d'évaluer les relations qui existent entre les différents mécanismes qui entrent en jeu durant le procédé de crêpage du papier utilisé par Kruger Produits Ltée. Étant donné la complexité du procédé, il a fallu mener de front des études sur les différents domaines que sont la qualité du papier, l'usure de la lame de crêpage et le suivi de l'usure par émission acoustique. Chacun de ces domaines est caractérisé par différents paramètres, ce travail montre qu'il existe une corrélation entre ces différents paramètres. Ce chapitre propose donc, à partir des tests effectués, la synthèse des conclusions partielles qui serviront à améliorer le procédé de crêpage du papier afin d'arriver à produire du papier de qualité avec une plus grande constance.

i. Conclusions des tests sur le papier

Les tests sur le papier ont permis de constater que des progrès significatifs pouvaient être faits afin d'améliorer la qualité de celui-ci. Les paramètres significatifs quant à la qualité du papier ont été identifiés comme étant le bouffant, la fréquence de crêpe, le poids de base, les forces de rupture et les paramètres associés aux forces de rupture (BLAH et GMT). Ces différents paramètres sont reliés entre eux d'une certaine façon. Par exemple, le bouffant est inversement proportionnel à la fréquence de crêpe et aux forces de rupture tandis que la fréquence de crêpe est proportionnelle avec les forces de rupture.

Les tests sur le papier ont aussi permis de montrer que les paramètres de qualité du papier évoluent en fonction du temps de crêpage pour une lame. En effet, le bouffant a tendance à augmenter en fonction du temps tandis que la fréquence de crêpe, les forces de rupture et l'allongement à la rupture ont tous tendance à diminuer en fonction du temps. Une évolution des paramètres papier se fait aussi à l'intérieur d'un même rouleau (environ 25 minutes). Il y a une augmentation marquée du bouffant selon la position de l'échantillon dans le diamètre du rouleau. Plus l'échantillon de papier est pris sur l'extérieur du rouleau, plus son bouffant est élevé. D'un autre côté, la fréquence de crêpe et les forces de rupture (GMT) ont tendance à diminuer avec le temps pour un même rouleau. Si ce problème provient de l'embobineuse, des actions devront être prises afin que le papier au centre du rouleau ne soit pas trop étiré ou compressé pour que les paramètres papier restent sensiblement les mêmes pour un même rouleau.

Des variations dans la qualité du papier sont aussi remarquées selon la position qu'ils occupent sur la largeur du rouleau de papier. Les échantillons au centre du rouleau ont toujours des paramètres avec des valeurs plus élevées qu'aux extrémités. Ainsi, le bouffant, les forces et le poids de base sont plus grands au milieu que sur les côtés.

ii. Conclusions des tests sur les lames

Les tests effectués sur les lames ont aussi permis de faire des constatations intéressantes. En effet il a été possible de montrer que la dureté des lames est variable d'une lame à l'autre. Cette dureté varie aussi selon la position du test sur la longueur pour une même lame. De plus, il a été démontré que la dureté des lames a tendance à diminuer pendant les 50 premières minutes d'usure et que cette dureté a tendance à augmenter ensuite.

L'analyse de la microstructure du matériau des lames a démontré que celles-ci subissaient un revenu et une décarburation causés par l'échauffement des lames et que cela était la cause de la chute de dureté des lames en fonction du temps d'exposition à l'usure.

D'autre part, des tests ont été menés sur les lames pour évaluer la largeur de celles-ci sur toute leur longueur. Ces tests ont montré qu'il existe des différences de largeur de lame aussi grande que 2,39 mm entre la position la plus large et la position la moins large pour une lame. Le fait que les lames soient plus larges au centre qu'aux extrémités fait en sorte que celles-ci ont un meilleur contact avec le yankee au milieu. Ce phénomène entraîne nécessairement une différence dans la qualité du crêpage du papier entre ces deux positions.

Les photos prises au MEB ont permis de faire quelques observations en ce qui a trait à la largeur des zones usées par frottement et en ce qui a trait aux aires des zones déformées plastiquement en fonction de la position sur la lame et en fonction du temps. Il a été remarqué que la largeur de la zone d'usure augmente lorsque l'on se rapproche du centre des lames. Cette observation est d'autant plus vraie pour les lames ayant un temps d'utilisation élevé. De plus, même si cela peut paraître assez évident, il a été vérifié que la largeur de la zone d'usure augmente en fonction du temps d'utilisation et ce, de façon assez linéaire. Il a aussi été remarqué que les tendances observées pour la largeur de la

zone d'usure sont aussi vraie pour l'aire de la zone déformée plastiquement en bout de lame, là où l'usure est présente.

Les tests au MEB ont aussi permis de faire le constat qu'immédiatement après l'aiguisage, la surface de contact lame-yankee est petite et les pressions superficielles élevées, ce qui favorise l'usure adhésive et abrasive. Par la suite, la perte de matière et la déformation plastique augmentent la surface de contact ce qui a pour effet de diminuer le taux d'usure et de favoriser l'usure corrosive. La force appliquée sur la lame est toujours la même et l'aire de contact évolue avec le temps, donc la pression varie en fonction du temps. Ces mécanismes tribologiques ont une influence importante sur la formation des crêpes et sur le procédé du crêpage.

Tous ces tests sur les lames permettent de conclure que l'entreprise devrait investir afin que les lames répondent mieux aux exigences du procédé de crêpage. Ainsi, un contrôle de la qualité du matériau des lames devrait être fait avant leur utilisation. Un meilleur contrôle de l'aiguisage devrait aussi être fait afin d'éviter de se retrouver avec des lames dont les dimensions varient trop. De plus, un contrôle de la cambrure des lames devrait aussi être mené afin d'éviter d'utiliser des lames trop ondulées. Finalement, le choix du matériau utilisé pour les lames devrait faire l'objet d'une étude afin d'en trouver un plus adapté au procédé de crêpage.

iii. Conclusions des tests d'émission acoustique

La tendance de certains paramètres d'émission acoustique en fonction du temps donne généralement une bonne idée de l'évolution du comportement des lames de crêpage durant le procédé. Deux paramètres d'émission acoustique ont été choisis : le niveau RMS (racine de la moyenne quadratique) et la fréquence moyenne des signaux. Ces paramètres ont été choisis parce qu'ils fournissent une information de nature différente sur les signaux d'émission acoustique. Le niveau RMS renseigne sur l'énergie libérée lors de la friction entre la lame et le yankee tandis que la fréquence moyenne donne de l'information sur les mécanismes sources d'émission acoustique.

Tout d'abord, on observe une variation au début du crêpage qui est caractérisée par une chute brusque de la courbe RMS. Ensuite, tout au long du test, il y a des pics de variation qui apparaissent à diverse période de la durée de vie de la lame. Les variations observées sur les courbes de distribution d'émission acoustiques témoignent de l'intensité du frottement que subit la lame lorsqu'elle est en contact avec le yankee et le

papier. Les courbes de distribution de fréquence moyenne montrent des comportements très variés. On retrouve tantôt une augmentation, tantôt une diminution de la fréquence moyenne en fonction du temps. Cela indique que les sources d'émission acoustique peuvent varier de lames en lames et qu'elles peuvent aussi varier d'un côté à l'autre d'une lame.

La projection des paramètres RMS et fréquence moyenne et une analyse en composantes principales des paramètres d'émission acoustique à l'aide du logiciel Noesis^{MD} ont permis de faire la comparaison des lames entre elles. Grâce à cette analyse, il a été possible de constater que les lames n'ont pas toutes le même comportement face au frottement et à l'usure. Le frottement des lames est plus ou moins variable dépendamment des conditions environnementales favorisant une usure sévère ou modérée, des conditions géométriques des lames, tel que les conditions de cambrage, qui favorisent des pressions élevées sur des endroits spécifiques suivant la largeur des lames, et des conditions métallurgiques du matériau favorisées par l'échauffement des lames et par les déformations plastiques induites aux niveau de la pointe des lames.

iv. Conclusions sur la synthèse des tests

À partir des différents tests menés sur le papier, les lames et à partir du suivi par émission acoustique, des corrélations ont pu être établies. Ces corrélations permettent d'élaborer des recommandations sur le procédé de crêpage.

Premièrement, il est possible de remarquer que la largeur de la lame est intimement liée aux paramètres de qualité du papier. En effet, le bouffant suit la même tendance que la largeur de la lame. Il en est de même pour le GMT, un paramètre calculé à partir des résistances sens machine et sens transverse. Plus la lame est large, plus le bouffant et le GMT sont grands. Ceci est probablement dû au fait que les parties les plus larges des lames ont un meilleur contact avec le yankee.

Il a aussi été possible de remarquer que la largeur des lames a un effet sur l'usure de celles-ci. Il a été démontré que le centre des lames comporte toujours un biseau d'usure plus large que sur les côtés. Ceci est imputable au fait que les lames sont normalement plus larges au milieu que sur les côtés après quelques aiguisages. De plus grandes largeurs impliquent un contact plus intime entre la lame et le yankee, et donc une usure plus sévère.

On a aussi pu voir que l'augmentation de la zone de contact due à l'usure de la lame avait pour effet de faire diminuer la pression effective de la lame sur le yankee. Cette diminution de pression a indéniablement un effet sur le procédé de crêpage et par le fait même sur la qualité du papier produit. En effet, plus la pression diminue, plus la fréquence de crêpe en fait de même.

Aussi, il a été possible de remarquer que le «stick out» affecte l'angle de crêpage. Plus il est petit, plus l'angle de crêpage est petit et plus il est grand, plus l'angle de crêpage est grand. Un petit «stick out» induit donc un bouffant élevé et une fréquence de crêpe faible (douceur faible) tandis qu'un grand «stick out» induit un bouffant faible et une fréquence de crêpe élevée (douceur élevée) et ce, pour un angle de lame donné. Il affecte aussi l'angle formé par le biseau. Plus il est grand, plus l'angle formé par le biseau est petit. Ainsi, il fait en sorte que le biseau d'usure est différent. Il serait souhaitable de pouvoir ajuster plus précisément la position du bas de la lame de crêpage afin de garder un « stick out » constant entre deux lots de lames. Il serait aussi souhaitable d'avoir un meilleur contrôle sur les angles impliqués dans le crêpage du papier.

De plus, des phénomènes intéressants ont été remarqués après 50 minutes d'usure des lames. Après 50 minutes de crêpage, il semble que la dureté et la microdureté aient tendance à augmenter, que l'écart entre les aires des zones déformées plastiquement au centre et aux extrémités des lames ait lui aussi tendance à augmenter et que le taux de perte de matière de la lame ait tendance à diminuer. En fait, toutes ces tendances sont reliées entre elles d'une certaine façon et elles ont une influence directe sur le procédé et la qualité du papier. Il semble donc que l'état d'usure de la lame soit idéal après 50 minutes pour produire du papier de bonne qualité. L'étude de l'état de la lame permet donc de connaître les conditions métallurgiques qui peuvent mener au bon fonctionnement du procédé de crêpage du papier.

Il est aussi possible de corréler l'émission acoustique générée par la friction entre la lame et le yankee avec l'usure que subie la lame et les variations métallurgiques induites au niveau de la pointe. En première approximation, on distingue trois phases :

- Une première phase qui correspond à l'initiation des phénomènes d'usure (augmentation du niveau RMS). La phase 1 correspondrait donc à la mise en contact de la lame avec le yankee, source de l'usure abrasive provoquant une augmentation de la « charge » sur la lame.
- Une deuxième phase qui est caractérisée initialement par une chute brutale du niveau RMS, ensuite la chute varie en diminuant avec un taux plus faible. Durant

cette phase, on suppose que le matériau au niveau de la pointe subit un ramollissement après l'échauffement brutal de la lame.

- Enfin une dernière phase de stabilisation du niveau RMS, durant cette phase le matériau subit un léger durcissement dû à l'écrouissage induit à la pointe par la persistance de la déformation plastique, ceci se traduit au niveau de la courbe RMS par une stabilisation de la courbe de distribution.

Il est aussi possible de faire des liens entre l'émission acoustique générée par le frottement entre la lame et le yankee et la qualité du papier produit. Il a été permis de constater que le niveau RMS, qui est un indicateur de la sévérité de l'usure, est inversement proportionnel avec le bouffant et proportionnel à la fréquence de crêpe et au BLAH. Ainsi, moins le taux d'usure est sévère, plus la qualité du papier est bonne. De plus, il est possible de remarquer que les valeurs les plus faibles du bouffant correspondent à des fréquences moyennes faibles et des énergies de signaux élevées. Les valeurs du bouffant les plus élevées sont obtenues pour des fréquences moyennes élevées et des énergies d'usure modérées.

v. Nouvelles perspectives de recherche

Il a été démontré que l'utilisation d'un réseau de neurones pouvait permettre de prévoir la qualité du papier à partir des données d'émission acoustique. Il serait intéressant de continuer à investiguer cette avenue puisque celle-ci permettrait d'optimiser le changement des lames et d'améliorer grandement la qualité du papier produit en se basant seulement sur les signaux d'émission acoustique. Pour ce faire, il faudrait être en mesure d'implanter un système fixe capable de faire le suivi par émission acoustique de l'usure des lames de crêpage.

Dans un autre registre, il serait aussi intéressant d'envisager un asservissement soit de la force appliquée par la lame sur le yankee, soit de la géométrie du montage en ajustant la position des supports pour changer l'angle de contact entre la lame et le yankee. Il serait alors possible de modifier en cours de procédé, la qualité du papier produit afin de rencontrer les objectifs.

BIBLIOGRAPHIE

1. ASHBY, M.F., JONES, D.R.H. (1991) *MATÉRIAUX : 1. Propriétés et applications*, Cambridge, Dunod, 278 p.
2. BARANOV, V., KUDRYAVTSEV, E., SARYCHEV, G., SCHAVELIN, V. (2007) *Acoustic emission in friction*, Oxford, Elsevier, 218 p., 2007.
3. BELAS, O. M. (2001) *An approach to evaluation of wear of friction couples by the method of acoustic emission*, Materials Science, Vol. 37, No. 1, p.103-105.
4. BEREZNYAKOV, A.I., STADNICHENKO, V.N. (1998) *Correlation of surface acoustic emission of a tribosystem and its tribological behaviour*, Journal of Friction and Wear, Vol. 19, No. 3, pp.22-27.
5. BINET, A., BOUCHARD, P.-L., FECTEAU, M.-E., FOURNIER, V., LA HAYE, M., LÉVESQUE, J.-P., PEPIN, C. (2006) *Usure de la lame de crépage*, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 48 p.
6. ÇENGEL, Y. A. (2003) *Heat and mass transfer*, New-York, McGraw-Hill Companies, 901 p.
7. DROESBEKE, J.-J., FICHET, B., TASSI, P. (2002) *Modèles pour l'analyse des données multidimensionnelles*, Paris, Economica, 362 p.
8. FRETJ, S., ERIKSSON, T. (1999) *Creping blade and creping holder - key functions in tissue quality*, BTG, 8 p.
9. GUO, Y.B., AMMULA, S.C. (2005) *Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, pp. 1622-1627.
10. HISAKADO, T., WASHINA, T. (1998) *Relationship between friction and wear and acoustic emission characteristics : iron pin on hardened bearing steel disk*, Wear, Vol. 216, p. 1-7.
11. JAHANMIR, S., SUH, N. P., and ABRAHAMSON, E. P. (1974) *Microscopic Observations of the Wear Sheet Formation by Delamination*, Wear, Vol. 28, p.235-249.
12. KAPSA, P., CARTIER, M. *Usure des contacts mécaniques - Manifestations de l'usure*, article extrait des techniques de l'ingénieur, traité Génie mécanique BM 5 067.
13. KRÖSE, B., VAN DER SMAGT, P. (1996) *An Introduction to Neural Networks*, Amsterdam, The University of Amsterdam, 135 p.
14. LEBLANC, R.D. (1999) *Évaluation de l'effet de surchauffe des alliages d'aluminium par ultrasons et laser-ultrasons*, École de Génie, Université de Moncton, 148 p.
15. MCCONNELL, W. *The science of creping*, Tissue World Americas, 8 p.
16. MECHEFSKE, C. K., SUN, G., SHEASBY, J. (2002) *Using acoustic emission to monitor sliding wear*, Insight-Wigston then Northampton, Vol. 44, No 8, p. 490-497.
17. POLLOCK A. (1989) *Acoustic Emission Inspection*, Metals Handbook, ninth edition, vol. 17, pp. 278-294.
18. RAMASUBRAMANIAN, M.K., SHMAGIN, D.L. (2000) *An Experimental Investigation of the Creping Process in Low-Density Paper Manufacturing*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 576-581.

19. RAVINDRA, H.V., SRINIVASA, Y.G., KRISHNAMURTHY, R. (1997) *Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting*, Wear, Vol. 212, p.78-84.
20. RIPPENGILL, S., WORDEN, K. HOLFORD, K.M., PULLIN, R. (2003) *Automatic classification of acoustic emission patterns*, strain, vol. 39, n° 1, pp. 31-41.
21. RUMELHART, D.E., McCLELLAND, J.L. (1986) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, Cambridge, the MIT Press, 567 p.
22. SITT, J. (2003) *Better bond, softer tissue*, Tissue world, Memphis, 5 p.
23. SUH, N.P. and SIN, H.-C. (1981) *The genesis of friction*, Wear, Vol.69, pp. 91-144.
24. SUN, Jun, WOOD, R.J.K., WANG, Ling (2005) *Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic emission techniques*, Wear, vol. 259, pp. 1482-1489.
25. VARMA, S., BARAS, J.S. (2002) *Tool Wear Estimation from Acoustic Emissions: A Model Incorporating Wear-Rate*, Proceedings - International Conference on Pattern Recognition, vol. 16, pp. 492-495.

Annexe I

Évolution des paramètres de qualité du papier en fonction du temps

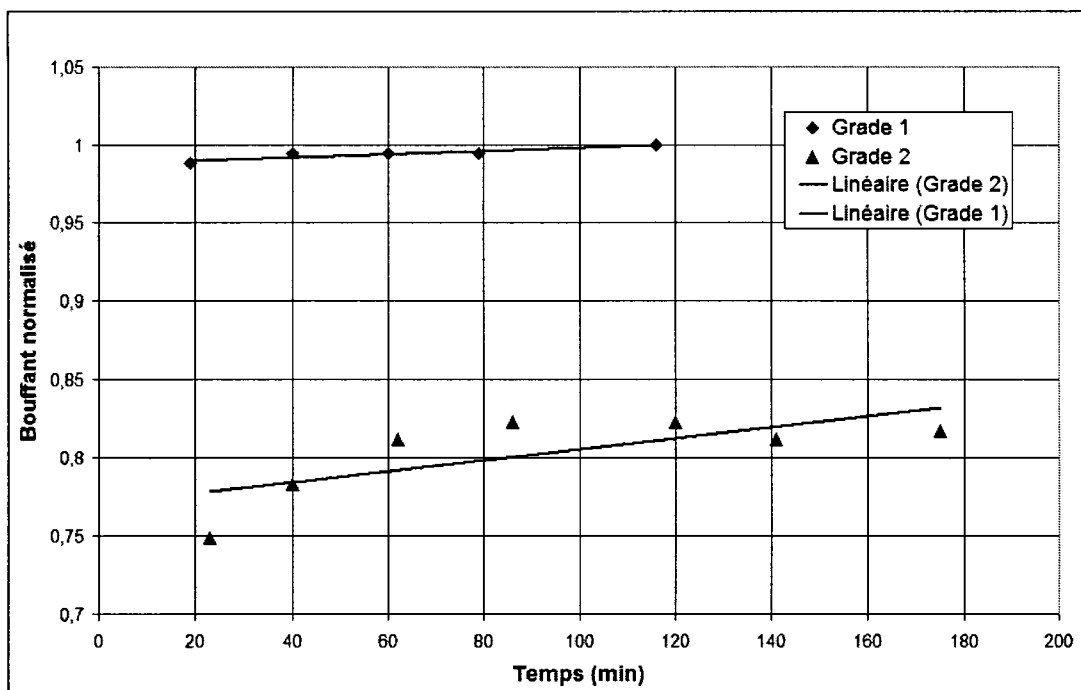


Figure A.1 : Évolution du bouffant en fonction du temps pour deux grades de papier

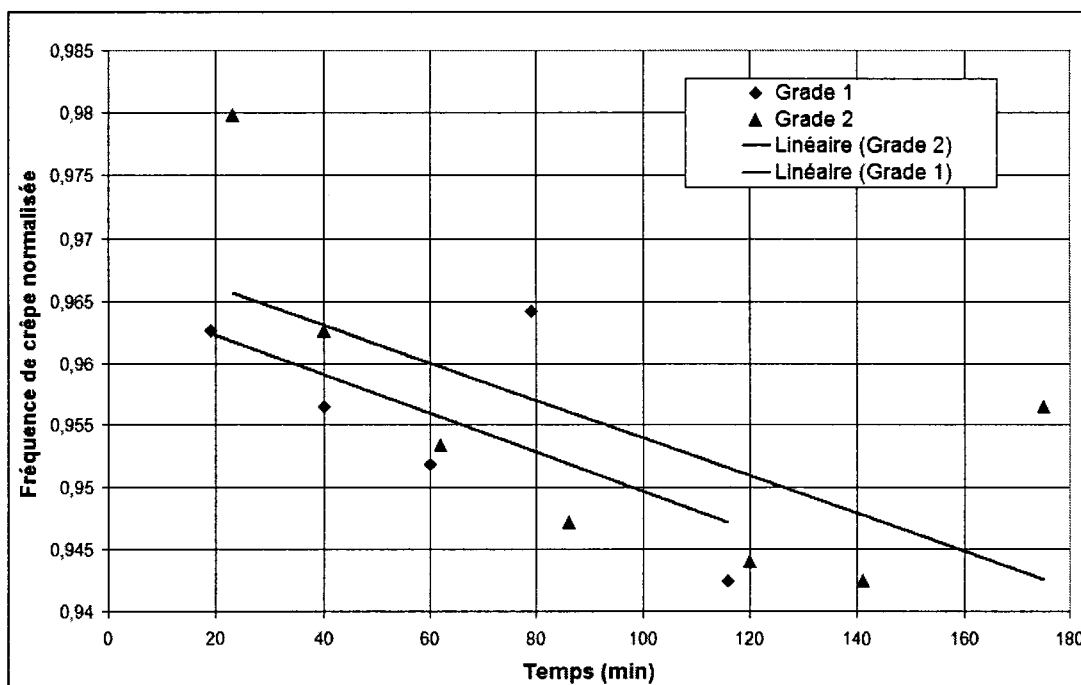


Figure A.2 : Évolution de la fréquence de crêpe en fonction du temps pour deux grades de papier

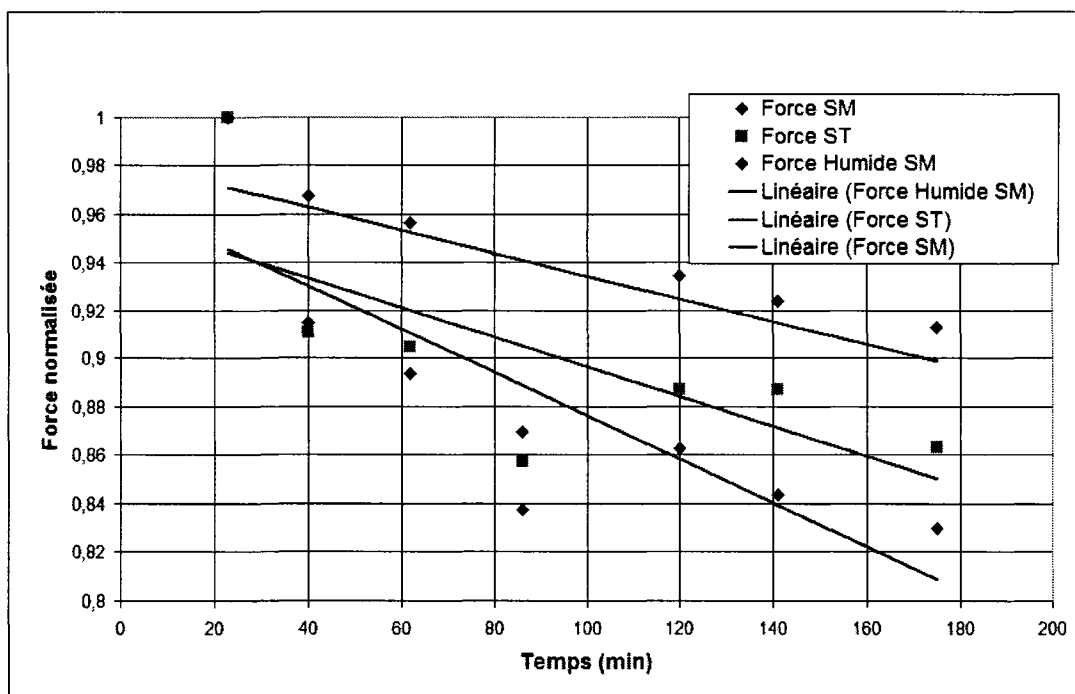


Figure A.3 : Évolution des forces sens machine, sens travers et humide en fonction du temps pour le grade de papier 2

Annexe II

Tests sur la largeur des lames selon la position longitudinale

Tableau A.1 : Largeur des lames selon la position longitudinale

Lames	L5CC001	L5CC002	L5CR001	L5CR003	L5CR004
Distance	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	109,8	90,51	101,91	102,67	107,31
20	109,75	90,59	101,88	102,61	107,51
30	109,69	90,75	102,01	102,55	107,68
40	109,67	90,96	102,15	102,51	107,96
50	109,7	91,03	102,23	102,49	107,98
60	109,8	91,07	102,31	102,56	108,03
70	109,97	91,07	102,46	102,62	108,07
80	109,98	91,06	102,56	102,66	108,14
90	110,06	90,94	102,65	102,69	108,35
100	110,07	91	102,78	102,76	108,25
110	110,12	91,1	103,02	102,8	108,15
120	110,14	91,15	103,03	102,84	108,13
130	110,1	91,07	103,23	102,84	108,1
140	110,17	91,29	103,41	102,81	108,06
150	110,14	91,3	103,56	102,79	108,09
160	110,04	91,31	103,77	102,77	108,14
170	109,91	91,33	103,88	102,75	108,28
180	109,76	91,26	103,96	102,72	108,33
190	109,74	91,19	104,07	102,7	108,37
200	109,8	91,24	104,2	102,59	108,32
210	109,83	91,21	104,27	102,53	108,36
220	109,82	91,25	104,23	102,5	108,34
230	109,88	91,25	104,25	102,48	108,41
240	109,88	91,33	104,24	102,48	108,38
250	109,77	91,19	104,16	102,52	108,4
260	109,83	91,14	104,1	102,58	108,36
270	109,84	91,14	104,1	102,6	108,22
280	109,83	91,08	104,06	102,64	108,12
290	109,8	90,81	103,99	102,69	107,95
300	109,59	90,79	103,91	102,76	108,04
310	109,58	90,78	103,91	102,82	108,04

Lames	L5CR005	L5CR006	L5CR007	L5CR008	L5CR009
Distance	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	99,43	99,42	105,85	99,49	99,57
20	99,53	99,65	105,82	99,71	99,62
30	99,62	99,89	105,86	99,92	99,7
40	99,78	100,05	105,96	99,91	99,8
50	99,96	100,24	106	100,02	99,87
60	100,07	100,32	106,17	100,2	99,9
70	100,21	100,36	106,22	100,2	100,04
80	100,29	100,38	106,28	100,2	100,08
90	100,28	100,34	106,31	100,13	100,16
100	100,37	100,36	106,34	100,16	100,32
110	100,45	100,41	106,37	100,12	100,37
120	100,44	100,38	106,43	100,09	100,53
130	100,52	100,33	106,46	100,2	100,59
140	100,62	100,37	106,47	100,22	100,71
150	100,64	100,38	106,54	100,16	100,76
160	100,69	100,4	106,38	100,17	100,79
170	100,73	100,37	106,32	100,18	100,8
180	100,73	100,34	106,35	100,18	100,75
190	100,73	100,36	106,22	100,19	100,74
200	100,73	100,39	106,21	100,26	100,67
210	100,67	100,39	106,25	100,25	100,67
220	100,54	100,38	106,19	100,23	100,65
230	100,48	100,42	106,19	100,28	100,57
240	100,44	100,39	106,14	100,28	100,38
250	100,33	100,26	106,02	100,2	100,2
260	100,22	100,08	106	100,17	100,07
270	100,17	100,01	105,94	100,06	99,91
280	100,04	99,92	105,97	99,91	99,86
290	99,89	99,82	106,03	99,66	99,72
300	99,78	99,8	106,02	99,41	99,78
310	99,64	99,72	106,07	99,02	99,64

Lames	L5CR010	L5CR011	L5CR012	L5CR013	L5CR014
Distance	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	126,59	126,65	92,56	92,94	92,81
20	126,54	126,6	92,62	92,89	92,85
30	126,55	126,56	92,7	92,9	92,89
40	126,51	126,44	92,74	92,92	92,92
50	126,61	126,51	92,69	92,86	92,79
60	126,48	126,48	92,66	92,78	92,75
70	126,46	126,6	92,73	92,78	92,8
80	126,42	126,5	92,71	92,76	92,81
90	126,46	126,44	92,63	92,63	92,76
100	126,54	126,48	92,65	92,63	92,78
110	126,58	126,47	92,71	92,75	92,87
120	126,61	126,55	92,59	92,59	92,77
130	126,56	126,44	92,59	92,6	92,77
140	126,68	126,56	92,8	92,69	92,85
150	126,72	126,59	92,71	92,68	92,82
160	126,78	126,67	92,7	92,67	92,83
170	126,83	126,76	92,72	92,63	92,88
180	126,89	126,76	92,74	92,57	92,83
190	126,94	126,73	92,74	92,48	92,74
200	127,02	126,8	92,82	92,49	92,74
210	126,91	126,82	92,77	92,44	92,65
220	126,91	126,84	92,7	92,41	92,49
230	127,06	126,91	92,72	92,44	92,47
240	126,97	126,91	92,73	92,45	92,43
250	126,89	126,88	92,61	92,42	92,37
260	126,94	126,91	92,5	92,4	92,34
270	127,09	127	92,53	92,42	92,4
280	126,94	126,97	92,5	92,42	92,4
290	126,94	127	92,32	92,42	92,38
300	127,09	127,13	92,23	92,47	92,5
310	127,13	127,37	92,12	92,47	92,59

Lames	L5CR015	L5CR016	L5CR017	L5CR018	L5CR019
Distance	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	92,96	92,34	89,87	90,57	121,95
20	92,89	92,5	89,98	90,59	122,15
30	92,88	92,79	90,24	90,73	122,17
40	92,88	92,9	90,46	90,87	122,23
50	92,85	92,97	90,57	90,86	122,34
60	92,77	93,01	90,63	90,87	122,24
70	92,8	93	90,74	90,92	122,31
80	92,8	93,01	90,82	91	122,33
90	92,73	93	90,84	90,97	122,38
100	92,78	93,06	90,92	91,06	122,4
110	92,88	93,03	90,95	91,07	122,5
120	92,85	93,05	90,97	91,13	122,5
130	92,86	93,08	91,1	91,12	122,5
140	92,94	93,16	91,23	91,19	122,48
150	92,97	93,1	91,21	91,15	122,56
160	92,87	93,1	91,14	91,1	122,63
170	92,79	93,19	91,18	91,13	122,65
180	92,68	93,15	91,08	91,07	122,71
190	92,61	93,11	91,07	91,05	122,61
200	92,57	93,09	90,92	91,2	122,61
210	92,45	93	90,82	91,23	122,58
220	92,32	92,9	90,71	91,15	122,55
230	92,32	92,82	90,74	91,21	122,48
240	92,31	92,78	90,72	91,27	122,29
250	92,26	92,71	90,55	91,17	122,18
260	92,28	92,59	90,44	91,13	122,19
270	92,37	92,45	90,42	91,11	122,14
280	92,42	92,3	90,31	91,13	122,03
290	92,41	92	90,15	90,98	121,83
300	92,53	92,31	90,02	90,92	121,66
310	92,63	92,58	89,79	90,84	121,63

Lames	L5CR020	L5CR021	L5CR022	L5CR023	L5CR024	L5CR025
Distance	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur	Largeur
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	122,32	90,3	90,63	106,29	106,41	106,1
20	122,44	90,34	90,52	106,57	106,66	106,37
30	122,59	90,42	90,58	106,79	106,88	106,63
40	122,68	90,53	90,58	106,99	107,09	106,96
50	122,92	90,54	90,5	107,13	107,26	107,04
60	122,88	90,55	90,4	107,38	107,31	107,22
70	122,88	90,54	90,4	107,36	107,51	107,39
80	122,94	90,57	90,43	107,46	107,59	107,5
90	123,04	90,46	90,36	107,54	107,61	107,6
100	123,01	90,6	90,46	107,57	107,68	107,69
110	123,04	90,79	90,55	107,61	107,76	107,76
120	123,06	90,71	90,51	107,63	107,84	107,79
130	123,11	90,92	90,51	107,63	107,91	107,85
140	123,12	91,02	90,71	107,8	107,92	107,9
150	123,07	91,12	90,72	107,85	107,92	107,93
160	123,1	91,16	90,72	107,78	107,95	107,88
170	123,09	91,02	90,74	107,81	107,98	107,93
180	123,06	90,93	90,64	107,73	107,91	107,95
190	123,03	90,89	90,64	107,64	107,88	107,91
200	123,03	90,93	90,83	107,64	107,84	107,87
210	122,97	90,95	90,65	107,61	107,78	107,76
220	122,89	90,93	90,61	107,54	107,71	107,7
230	122,95	90,88	90,69	107,48	107,65	107,66
240	122,96	90,88	90,74	107,44	107,63	107,6
250	122,76	90,73	90,73	107,36	107,51	107,45
260	122,72	90,62	90,7	107,28	107,48	107,38
270	122,61	90,67	90,7	107,14	107,37	107,28
280	122,66	90,68	90,63	107,08	107,26	107,18
290	122,49	90,53	90,57	107,07	107,13	106,94
300	122,57	90,54	90,55	107	107,04	106,84
310	122,36	90,51	90,5	106,84	106,97	106,6

Annexe III

Évolution du RMS et de la fréquence moyenne en fonction du
temps pour toutes les lames

L5CR004

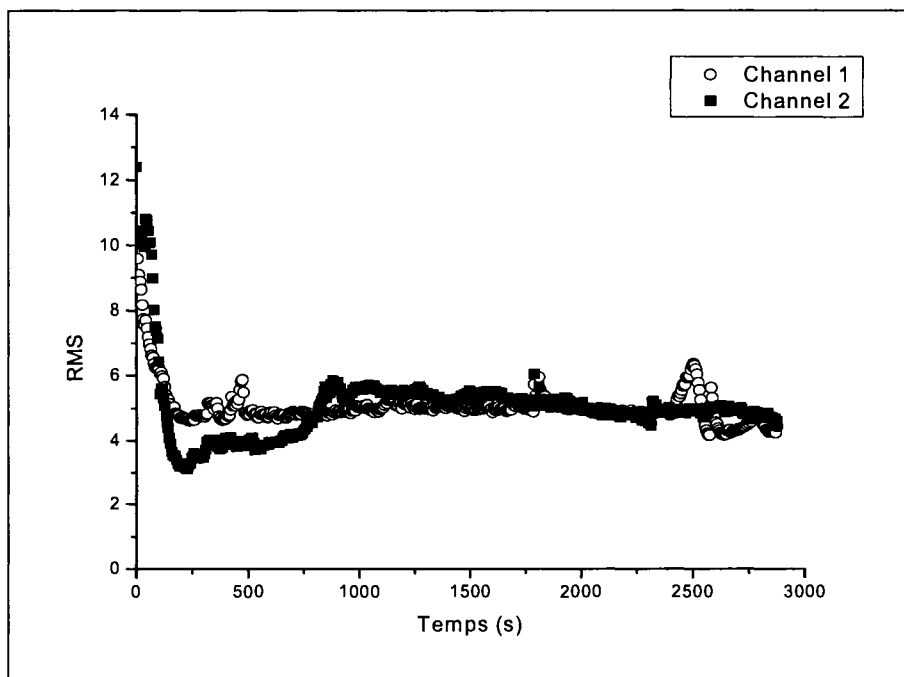


Figure A.4 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR004

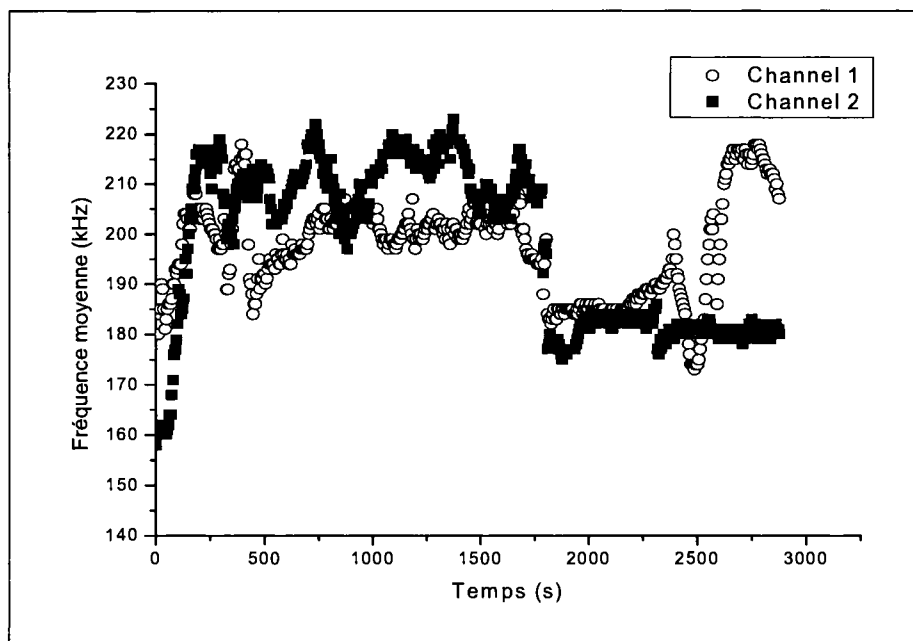


Figure A.5 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR004

L5CR006

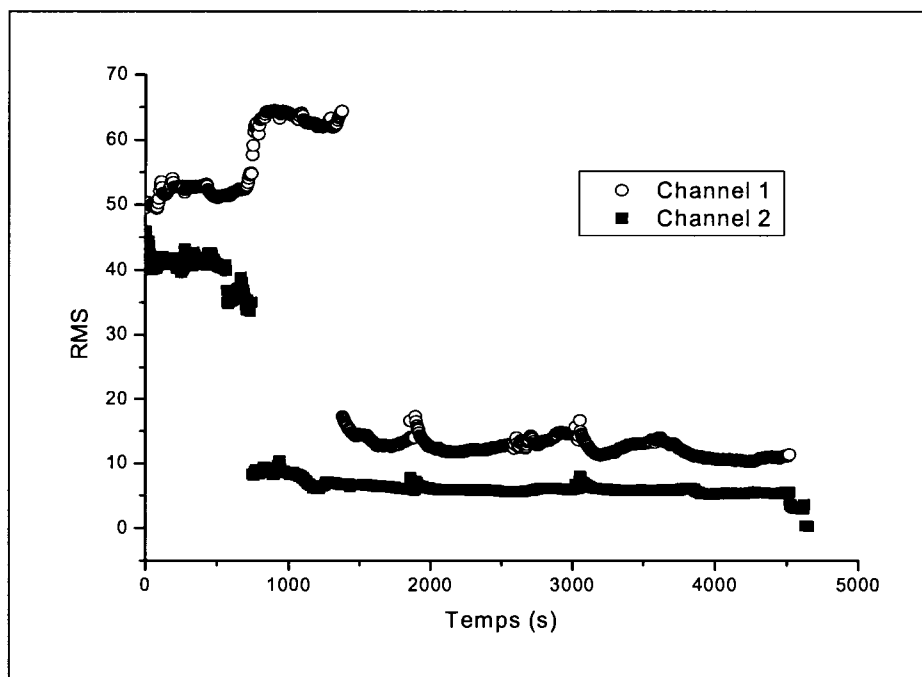


Figure A.6 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR006

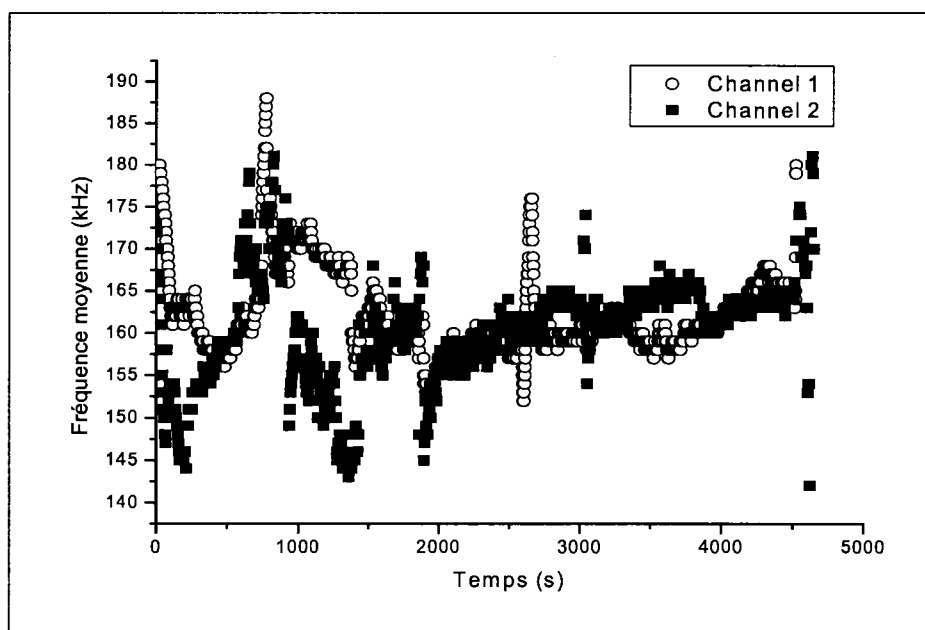


Figure A.7 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR006

L5CR008

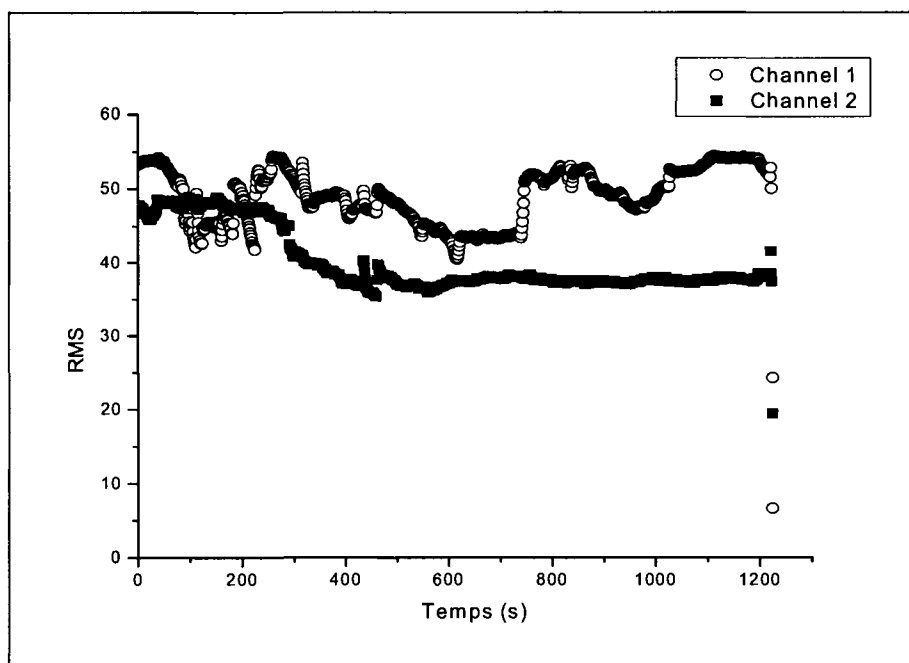


Figure A.8 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR008

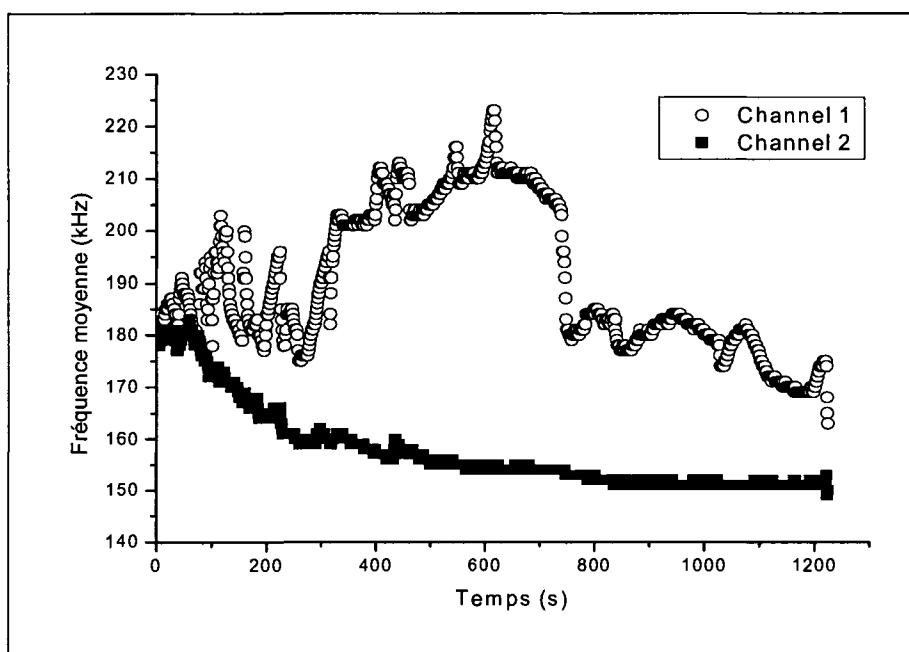


Figure A.9 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR008

L5CR009

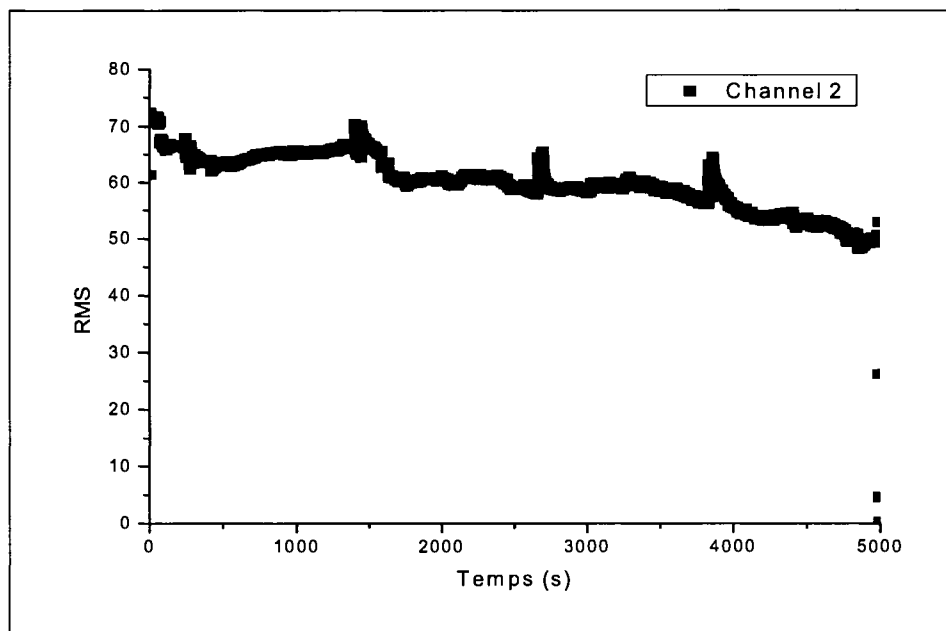


Figure A.10 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR009

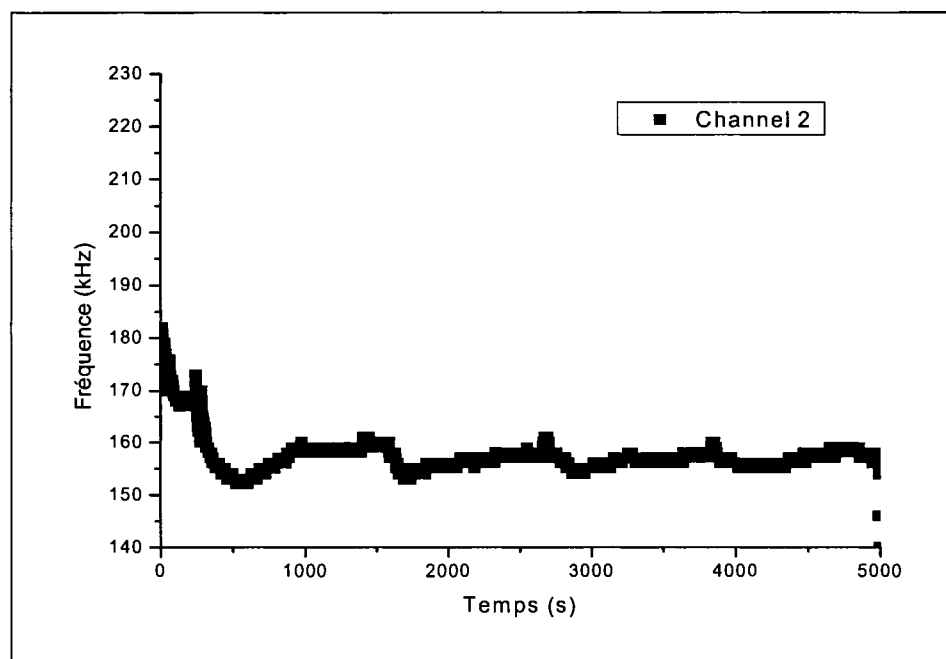


Figure A.11 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR009

L5CR017

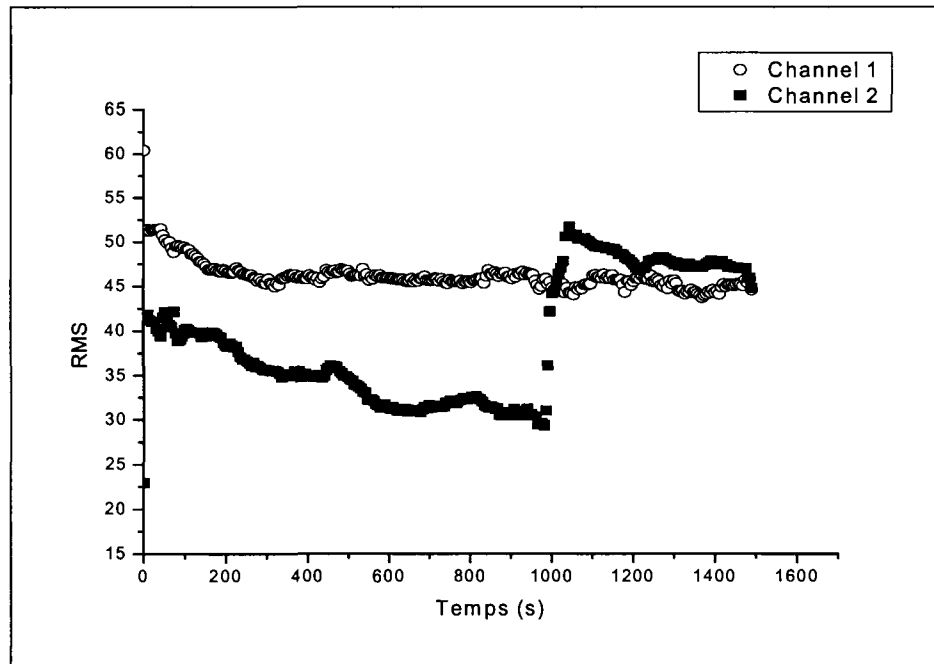


Figure A.12 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR017

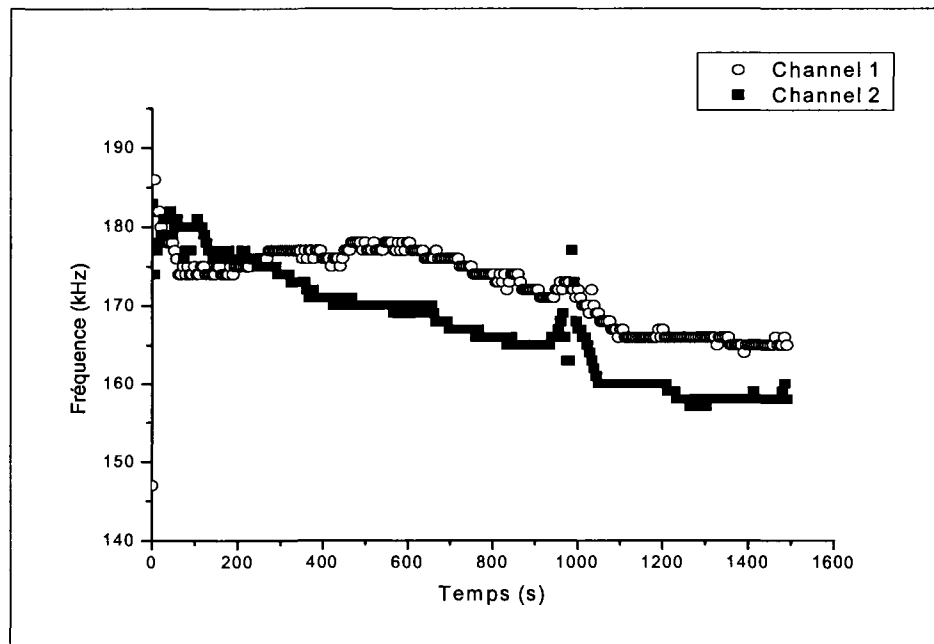


Figure A.13 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR017

L5CR018

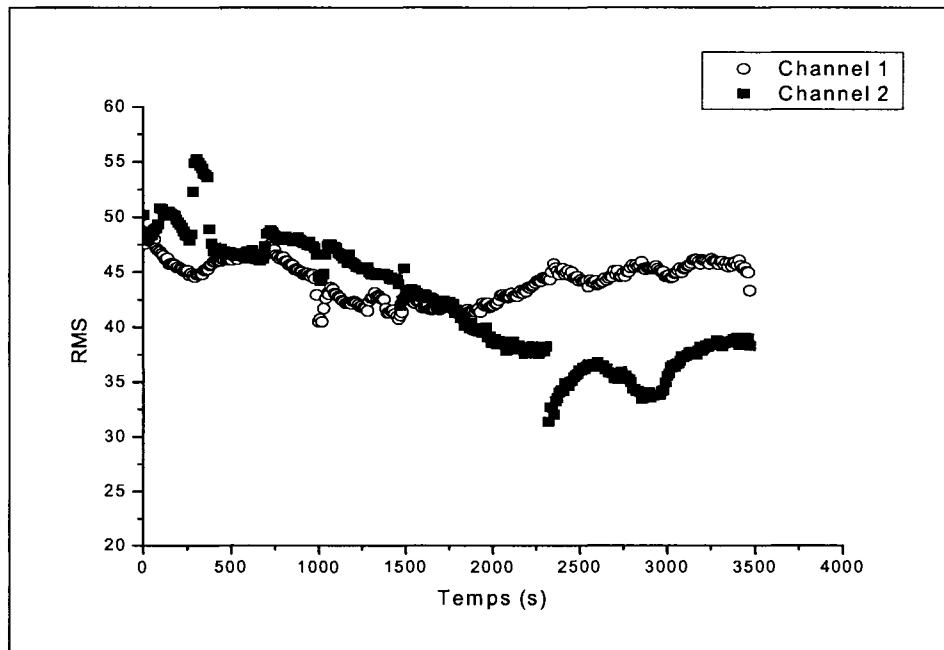


Figure A.14 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR018

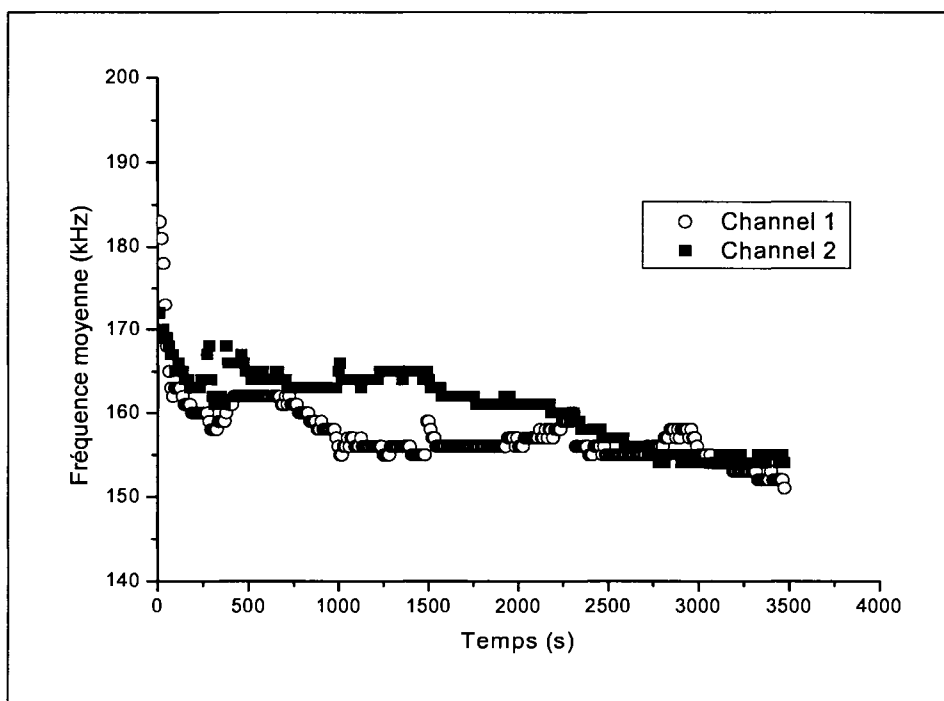


Figure A.15 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR018

L5CR019

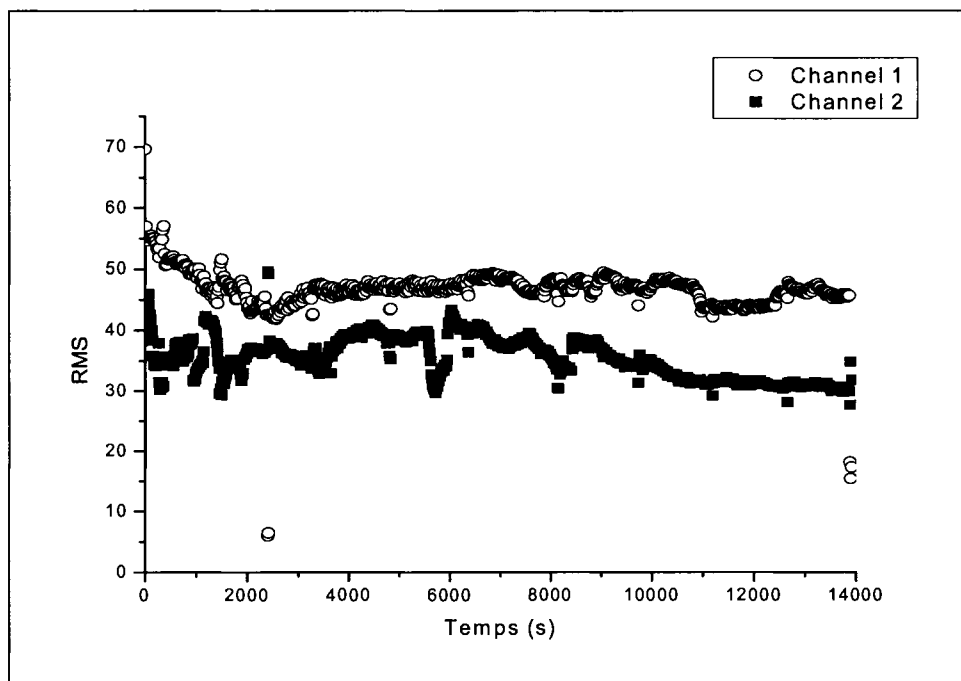


Figure A.16 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR019

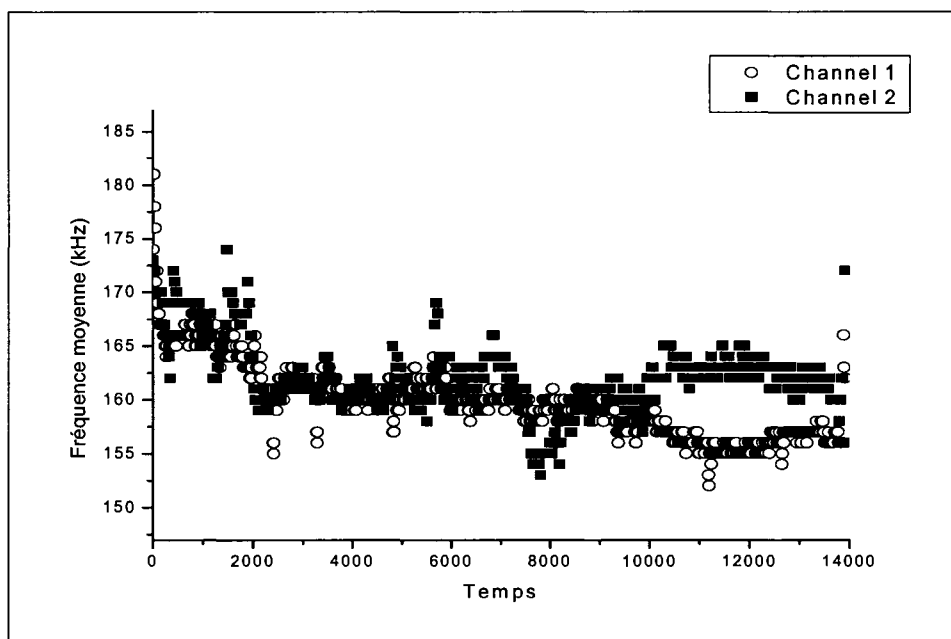


Figure A.17 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR019

L5CR020

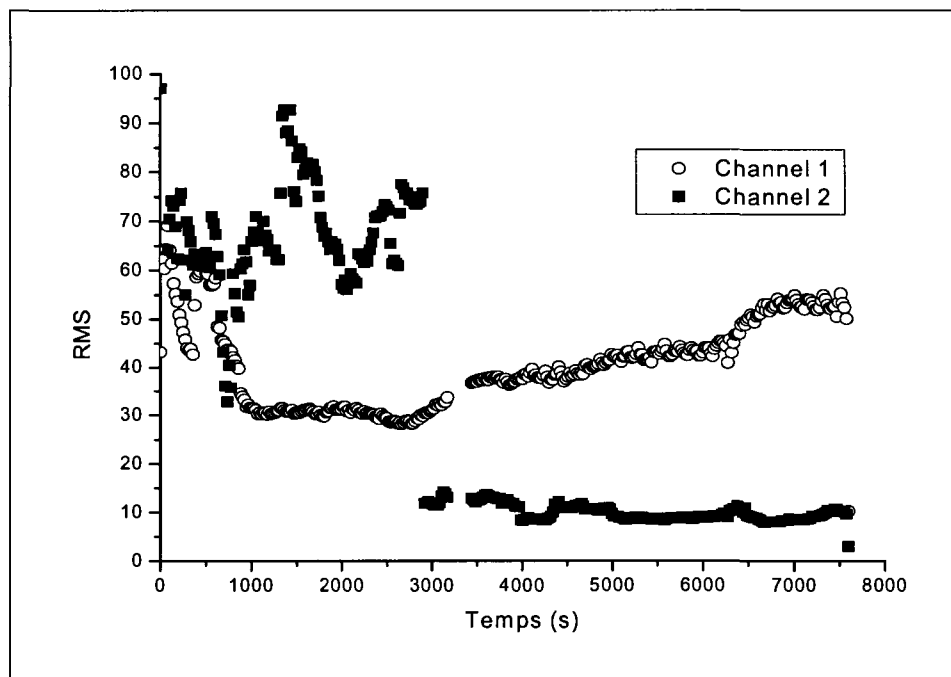


Figure A.18 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR020

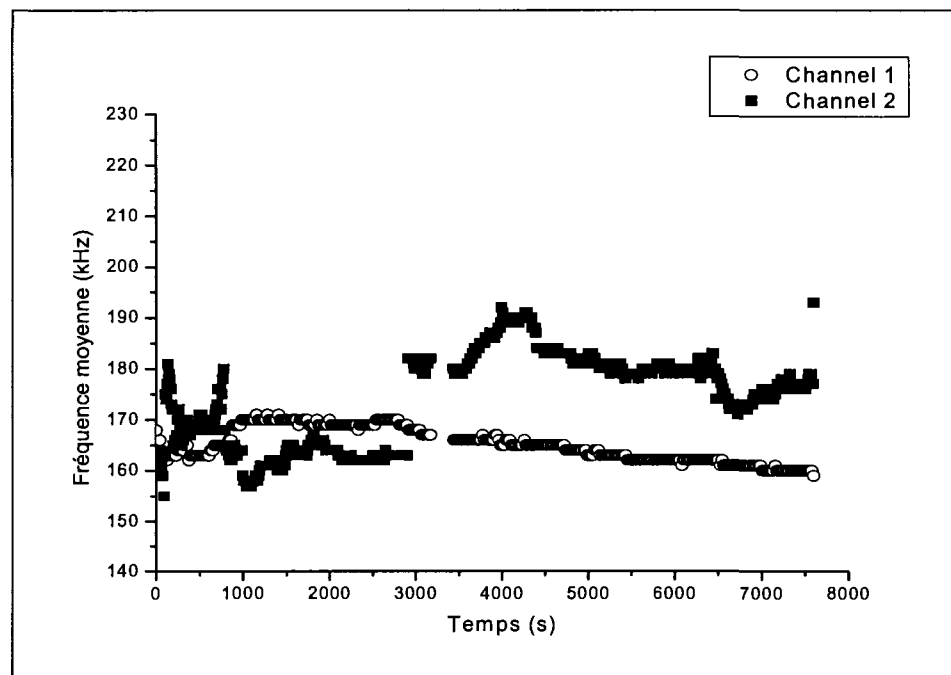


Figure A.19 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR020

L5CR022

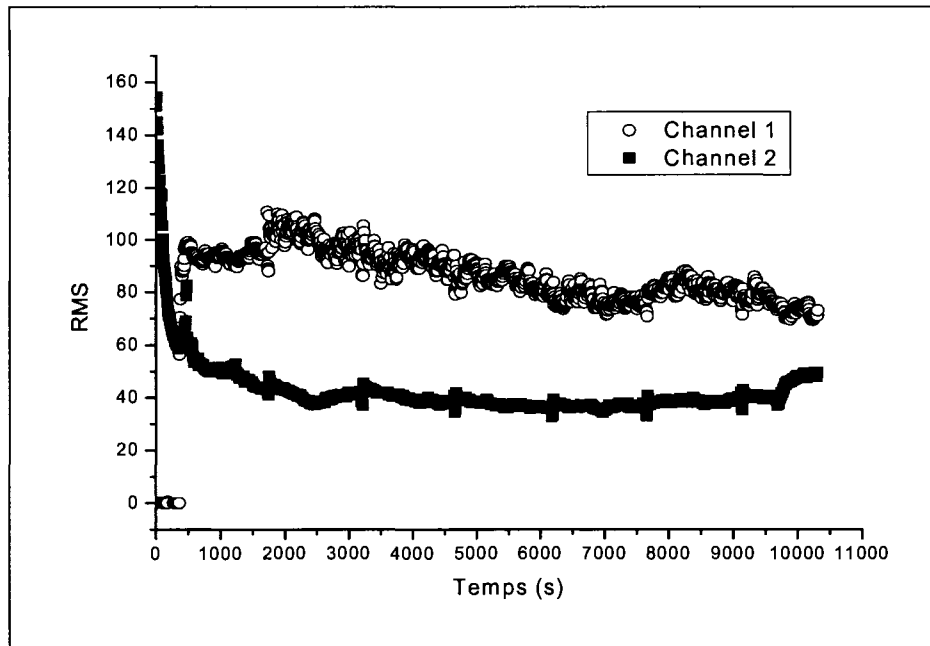


Figure A.20 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR022

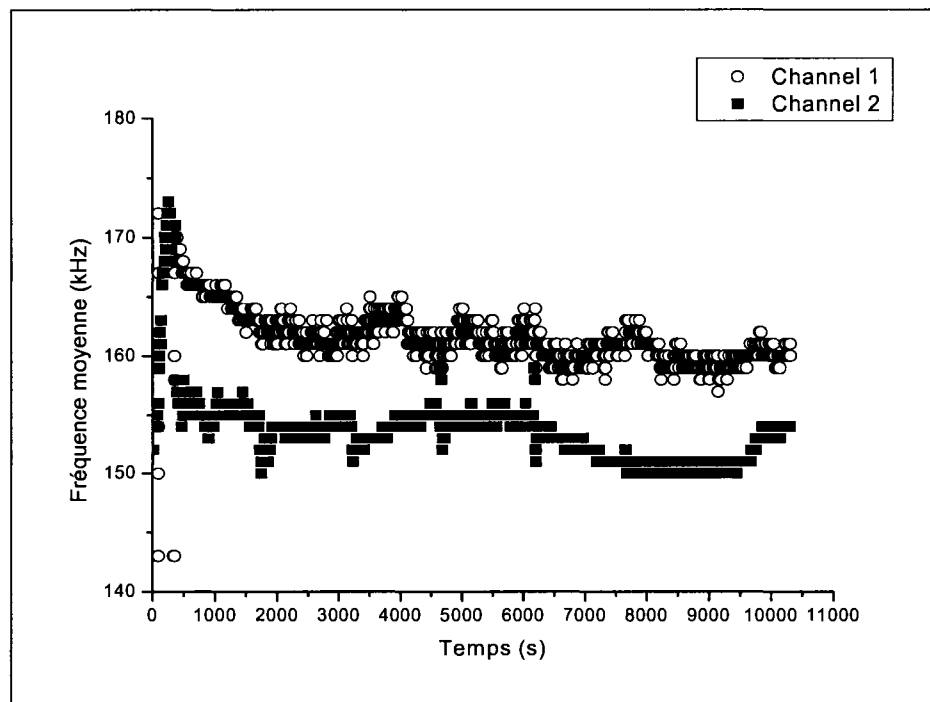


Figure A.21 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR022

L5CR024

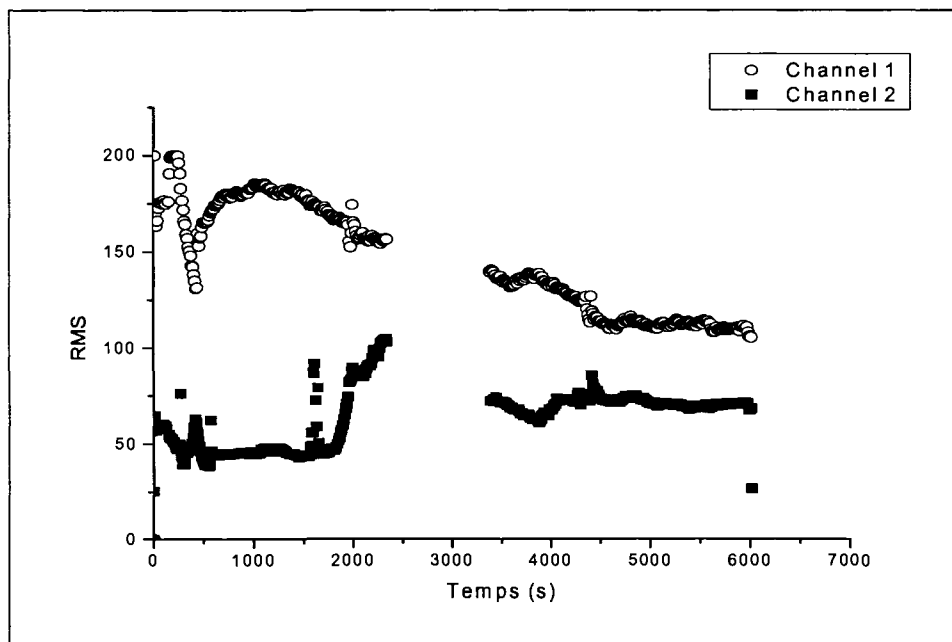


Figure A.22 : Évolution du paramètre RMS en fonction du temps pour la lame L5CR024

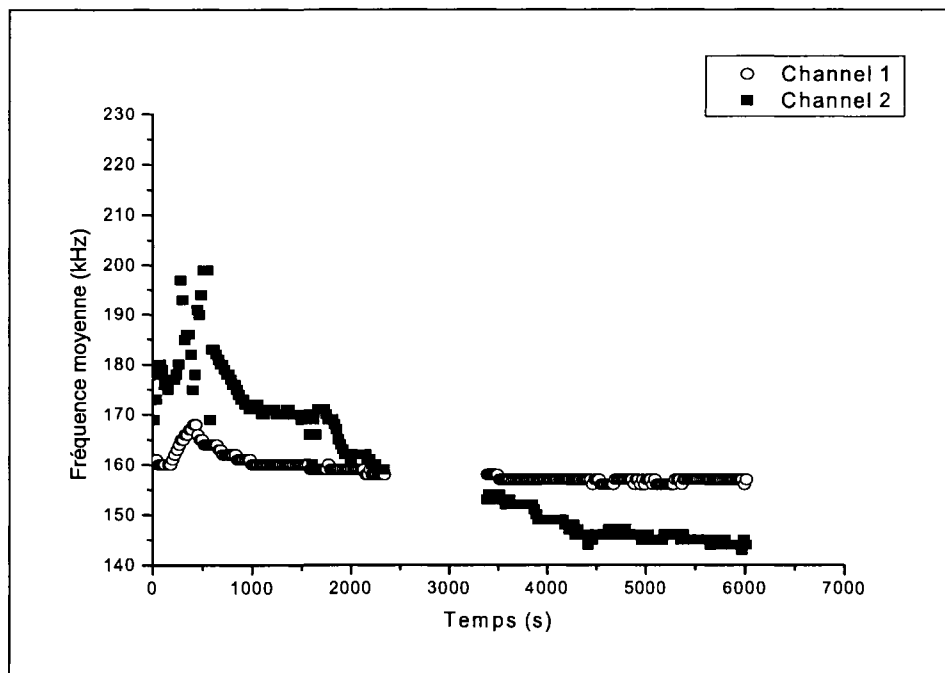


Figure A.23 : Évolution de la fréquence moyenne en fonction du temps pour la lame L5CR024

Annexe IV

Théorie relative aux réseaux de neurones et aux perceptrons
multicouches

i. Introduction

Les aspects majeurs que doivent posséder les modèles opérant en parallèle sont les suivants [Kröse et coll., 2006] :

- un ensemble d'unités de traitement (neurones, cellules).
- un état d'activation y_k pour chaque unité, qui est équivalent à la sortie de l'unité.
- des connexions entre les unités. Généralement, chaque connexion est définie par une pondération w_{jk} qui détermine l'effet qu'a le signal d'unité j sur l'unité k .
- une règle de propagation qui détermine les entrées s_k d'une unité à partir de ses entrées externes.
- une fonction d'activation F_k qui détermine le nouveau niveau d'activation en se basant sur les entrées $s_k(t)$ et les activations en cours $y_k(t)$.
- Un seuil (ou entrée externe) θ_k pour chaque unité.
- une méthode pour le rassemblement d'information.
- un environnement dans lequel le système doit opérer qui fournit des messages d'entrée et si nécessaire, des messages d'erreur.

La figure A.24 illustre ces différents aspects.

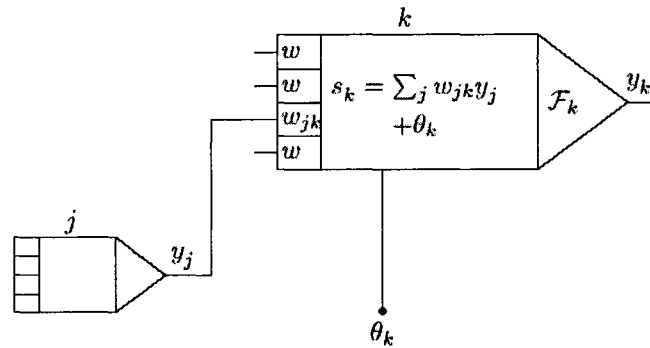


Figure A.24 : Les composantes de base d'un réseau de neurones artificiel. La règle de propagation utilisée ici est la sommation pondérée standard [Kröse et coll., 2006]

Chaque unité de traitement accomplit une tâche relativement simple : elle reçoit des entrées de sources externes ou de ses voisines et calcule un signal de sortie qui est transmis aux autres unités. De plus, les unités accomplissent une seconde tâche soit celle d'ajuster les pondérations. Le système fonctionne en parallèle dans le sens où

toutes les unités font leur calcul en même temps. Il existe trois types d'unités dans les réseaux de neurones : les unités d'entrée qui reçoivent les données à partir de l'extérieur du réseau, les unités de sortie qui envoient les données vers l'extérieur du réseau et les unités cachées dont leurs entrées et sorties restent à l'intérieur du réseau [Kröse et coll., 2006].

En général, on suppose que chaque unité fournit une contribution additionnelle à l'entrée de l'unité à laquelle elle est connectée. L'entrée totale pour une unité k est donc la somme pondérée des différentes sorties de chacune des unités qui y sont connectées plus un seuil ou décalage θ_k :

$$s_k(t) = \sum_j w_{jk}(t) y_j(t) + \theta_k(t) \quad (\text{A1})$$

Une pondération positive est considérée comme une excitation tandis qu'une pondération négative est considérée comme une inhibition [Kröse et coll., 2006].

On a aussi besoin d'une règle d'activation qui donne l'effet de l'entrée totale sur l'activation de l'unité. On a besoin d'une fonction F_k qui prend l'entrée totale s_k et l'activation en cours $y_k(t)$ et qui produit une nouvelle valeur d'activation pour chaque unité k :

$$y_k(t+1) = F_k(y_k(t), s_k(t)) \quad (\text{A2})$$

Souvent, la fonction d'activation est une fonction non décroissante de la valeur totale de l'entrée de l'unité :

$$y_k(t+1) = F_k(s_k(t)) = F_k\left(\sum_j w_{jk}(t) y_j(t) + \theta_k(t)\right) \quad (\text{A3})$$

Généralement, une fonction de seuil est utilisée : une fonction signe, une fonction linéaire ou semi-linéaire, ou une fonction sigmoïde (voir figure A.25). Dans certaines applications, une tangente hyperbolique est utilisée, donnant ainsi des valeurs de sortie dans la gamme $[-1, +1]$.

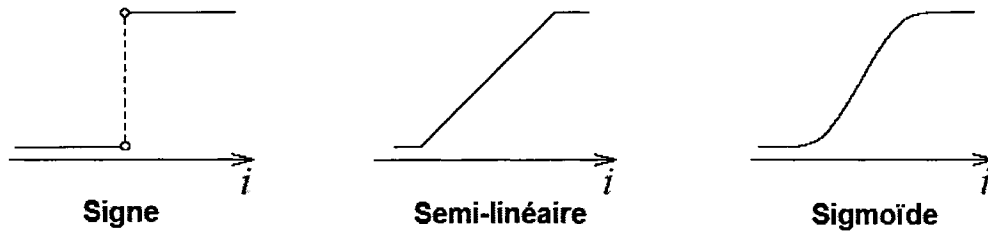


Figure A.25 : Fonctions d'activation possibles pour une unité [Kröse et coll., 2006]

i. Perceptron

Un réseau à réaction positive d'une seule couche consiste en un ou plusieurs neurones de sortie O , connectés à toutes les entrées i via un facteur de pondération w_{io} . Dans le cas le plus simple, le réseau n'a que deux entrées et une seule sortie comme le montre la figure A.26. L'entrée du neurone est la somme pondérée des entrées plus un terme de seuil.

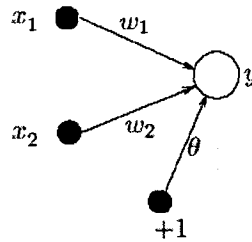


Figure A. 26 : Fonctions d'activation possibles pour une unité [Kröse et coll., 2006]

La sortie du réseau est formée par l'activation du neurone de sortie, qui est fonction de l'entrée :

$$y = F\left(\sum_{i=1}^2 w_i x_i + \theta\right) \quad (\text{A4})$$

La fonction d'activation F peut être linéaire ou non-linéaire. Dans cette section, on considère la fonction seuil (Heaviside ou Signe) :

$$F(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s > 0 \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A5})$$

La sortie du réseau est donc soit +1 ou -1, tout dépendant de l'entrée. Le réseau peut alors être utilisé pour faire de la classification. Si l'entrée totale est positive, l'échantillon

sera assigné dans la classe +1, si l'échantillon est négatif, il sera assigné à la classe -1. Dans ce cas, la séparation entre les deux classes est donnée par une ligne droite d'équation :

$$w_1x_1 + w_2x_2 + \theta = 0 \quad (\text{A6})$$

Une représentation géométrique du réseau de neurone à seuil linéaire est donnée sur la figure A.27.

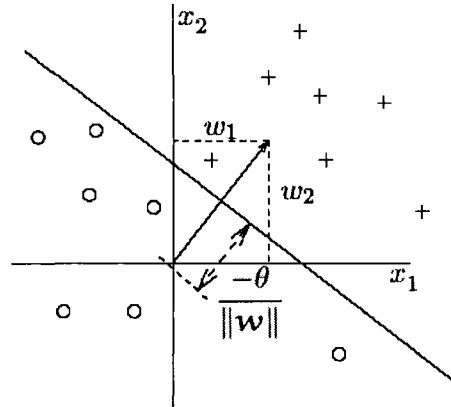


Figure A. 27 : Représentation géométrique de la fonction discriminante linéaire [Kröse et coll., 2006]

ii. Règle d'apprentissage perceptron

On suppose un ensemble d'échantillons d'apprentissage qui consiste en un vecteur d'entrée x et à une sortie désirée $d(x)$. Pour des fins de classification, le $d(x)$ est normalement +1 ou -1. La règle d'apprentissage perceptron peut être établie comme suit :

1. On commence avec des pondérations aléatoires pour les connexions
2. On choisi un vecteur d'entrée x à partir de l'ensemble des échantillons d'entraînement
3. Si $y \neq d(x)$, toutes les connexions w_i sont modifiées selon :

$$\Delta w_i = d(x)x_i \quad (\text{A7})$$

4. On retourne au point 2

Outre les connexions, il est nécessaire de modifier les seuils θ . Selon la règle perceptron cité plus haut, le seuil est modifié selon :

$$\Delta \theta = \begin{cases} 0 & \text{si le perceptron répond correctement} \\ d(x) & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A8})$$

iii. Perceptron multicouche

Pour la classification et la modélisation de fonctions, les perceptrons multicouches (PMC) sont très souvent utilisés. Ils représentent en fait la classe de réseaux de neurones la plus étudiée pour la classification et la modélisation de fonctions. Les perceptrons multicouches consistent en plusieurs couches de nœuds, interconnectés à l'aide d'arcs acycliques pondérés partant de la couche précédente vers la suivante, sans connections latérales ou rétropropagatives [Rumelhart et coll., 1986]. Chaque nœud calcule une transformation d'une combinaison linéaire pondérée de ses entrées avec le vecteur d'activation de sortie de la couche précédente, le vecteur colonne de pondération transposé et une fonction croissante non linéaire qui lui est lié. La figure A.28 montre un exemple d'un perceptron multicouche.

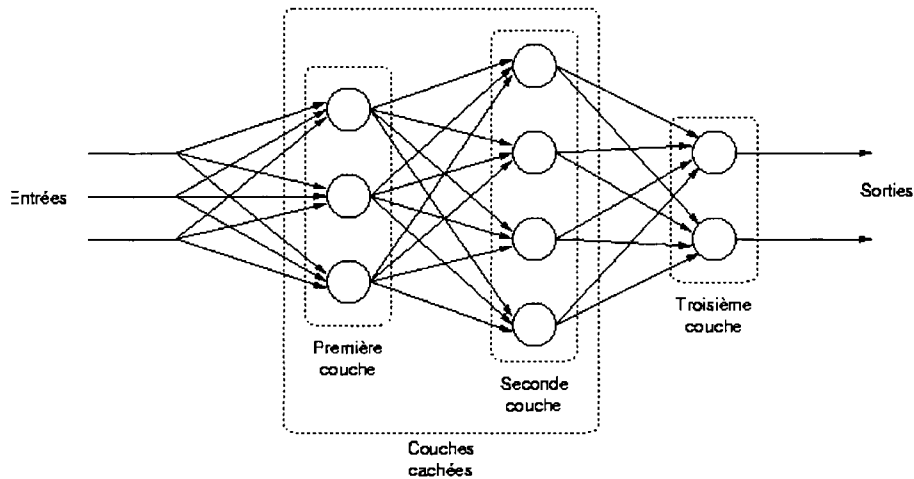


Figure A. 28 : Perceptron multicouche à trois couches [Rumelhart et coll., 1986]

Le perceptron est organisé en plusieurs couches. La première couche est reliée aux entrées, puis ensuite chaque couche est reliée à la couche précédente. C'est la dernière couche qui produit les sorties du PMC. Les sorties des autres couches ne sont pas visibles à l'extérieur du réseau, et elles sont appelées pour cette raison couches cachées.

Notons N_c le nombre de couches. L'indice l servira à désigner une couche, et notons

n_l le nombre de neurones dans la couche l . L'indice i désigne un neurone. Le vecteur

de poids du neurone i de la couche l est noté $w_{l,i}$, et tous les vecteurs de poids d'une couche sont regroupés dans une matrice W_l . En ce qui concerne les biais, on les considère souvent comme un poids supplémentaire associé à une entrée qui est toujours à 1. Notons a_l le vecteur regroupant les sorties des neurones de la couche l . Comme chaque couche est reliée à la précédente, a_l est également l'entrée de la couche $l+1$, en ajoutant l'entrée supplémentaire à 1 pour le biais. Par extension notons a_0 l'entrée du réseau [Rumelhart et coll., 1986].

On considère de plus que tous les neurones d'une couche ont la même fonction d'activation, mais qu'elle peut différer d'une couche à l'autre. La fonction d'activation des neurones de la couche l est notée f_l . On peut écrire la relation suivante pour exprimer la sortie d'une couche en fonction de son entrée :

$$a_l = f_l(a_{l-1} \cdot W_l) \quad (A9)$$

Le calcul de la sortie du perceptron multicouche se fait de manière itérative. Il faut tout d'abord placer les entrées du réseau dans le vecteur a_0 , puis appliquer l'équation A9 avec $l = 1, \dots, N_c$ afin de calculer successivement a_1, a_2, \dots, a_{N_c} . La sortie du réseau est alors a_{N_c} .

Les fonctions qu'il est possible de réaliser avec un PMC sont diverses. Dans un perceptron à une couche, il n'y a pas de couche cachée, et l'unique couche relie les entrées du réseau aux sorties. Si la fonction d'activation utilisée est une sigmoïde, chaque sortie est une sigmoïde de produit scalaire. L'espace d'entrée est donc coupé en deux par un hyperplan. La sortie est égale à 1 d'un côté de l'hyperplan et à -1 de l'autre côté, lorsque l'on est situé à une certaine distance de celui-ci. Pour des points situés près de l'hyperplan, la transition est progressive. Dans l'exemple simple d'un réseau à deux entrées et une sortie composé d'un unique neurone, l'hyperplan est une droite. La figure A.29 montre la sortie de ce neurone (axe vertical) en fonction de ses deux entrées (axes horizontaux) :

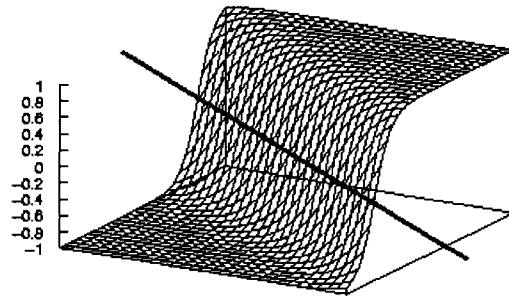


Figure A.29 : Sortie d'un perceptron à une couche en deux dimensions [Rumelhart et coll., 1986]

Dans ce neurone, le biais fixe la distance entre l'origine et la droite (figure A.29), tandis que le vecteur poids (à deux dimensions) est orthogonal à la droite, et donc fixe sa direction, ainsi que la "largeur" de la zone de transition : plus le module du vecteur poids est élevé, plus la sortie évoluera rapidement de -1 à 1 en traversant la droite.

Dans un perceptron à deux couches, les sorties du réseau seront des combinaisons des sorties de la première couche, et on voit apparaître des intersections entre les zones définies par les neurones de la première couche (figure A.30) [Rumelhart et coll., 1986].

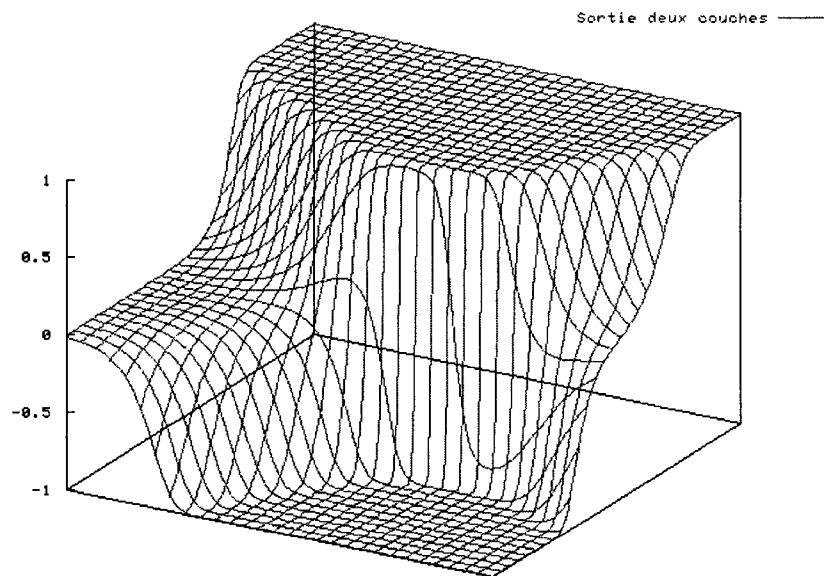


Figure A. 30 : Sortie d'un perceptron à deux couches en deux dimensions [Rumelhart et coll., 1986]

De manière plus analytique on peut considérer la sortie d'une couche (équation 17) comme une fonction vectorielle, dont les éléments constituent une base de fonctions. En ajoutant une seconde couche, les sorties sont des combinaisons des différents éléments de cette base, qui peuvent éventuellement servir à nouveau de base pour une autre couche. Le réseau est capable d'approximer n'importe quelle fonction douce avec une précision donnée, pourvu que l'on fournisse un nombre suffisant de neurones dans la couche cachée. Cependant en pratique il n'est pas forcément possible d'approximer toute fonction, car dans certains cas le nombre de neurones nécessaire peut être très important.

L'apprentissage d'un perceptron se fait avec une descente de gradient, algorithme décrit en annexe I. Dans le cas d'un perceptron à une couche l'expression de l'évolution des poids est assez simple. En effet l'erreur du réseau est de la forme :

$$e_{i,k} = f_1(W_{1,i} \cdot x_k) - y_{i,k} \quad (A10)$$

où i est le numéro de la sortie et k celui de l'exemple de la base d'apprentissage. La performance du réseau, une erreur quadratique moyenne, est :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{N_a} \sum_{k=1}^{N_a} \sum_{i=1}^{N_s} e_{i,k}^2 \quad (A11)$$

En appliquant à ces équations l'algorithme de descente du gradient, l'évolution des poids au cours d'une itération est donnée par :

$$\delta w_{i,k} = -2\eta \sum_{k=1}^{N_a} e_{k,i} f_1'(w_{1,i} \cdot x_k) x_k \quad (A12)$$

La performance du perceptron est :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{N_a} \sum_{k=1}^{N_a} \|a_{N_c,k} - y_k\|^2 \quad (A13)$$

En appliquant l'algorithme de descente du gradient à cette performance et en utilisant l'équation 17, on montre qu'une méthode itérative permet de calculer facilement le vecteur gradient. En effet, on peut exprimer l'évolution des poids sous la forme :

$$\delta w_{l,k} = -2\eta \sum_{k=1}^{N_a} e_{l,k,i} f'_l(w_{l,i} \cdot x_{l-1,k}) x_{l-1,k} \quad (A14)$$

où le terme d'erreur $e_{l,k}$ de composantes $e_{l,k,i}$ est de la forme :

$$e_{N_c,k} = a_{N_c,k} - y_k$$

$$e_{l,k,i} = \sum_{j=1}^{n_{l+1}} e_{l+1,k,j} w_{l+1,j,i} f'_{l+1}(w_{l+1,j} \cdot a_{l,k}) \quad (A15)$$

$$l = 1 \dots N_c - 1, \quad i = 1 \dots n_l$$

On constate que l'évolution des poids est similaire à celle vue pour le perceptron à une couche, en définissant une erreur sur chaque couche du perceptron. L'erreur de la dernière couche est effectivement l'erreur du réseau, et pour chaque couche cachée les erreurs sont calculées à partir des erreurs de la couche suivante. Pour chaque neurone l'erreur est la somme des erreurs de chaque neurone de la couche suivante, pondérée par le poids qui le lie au neurone dont on calcule l'erreur et par la dérivée de la fonction d'activation. Pour cette raison cet algorithme est appelé rétropropagation de l'erreur (figure A.31).

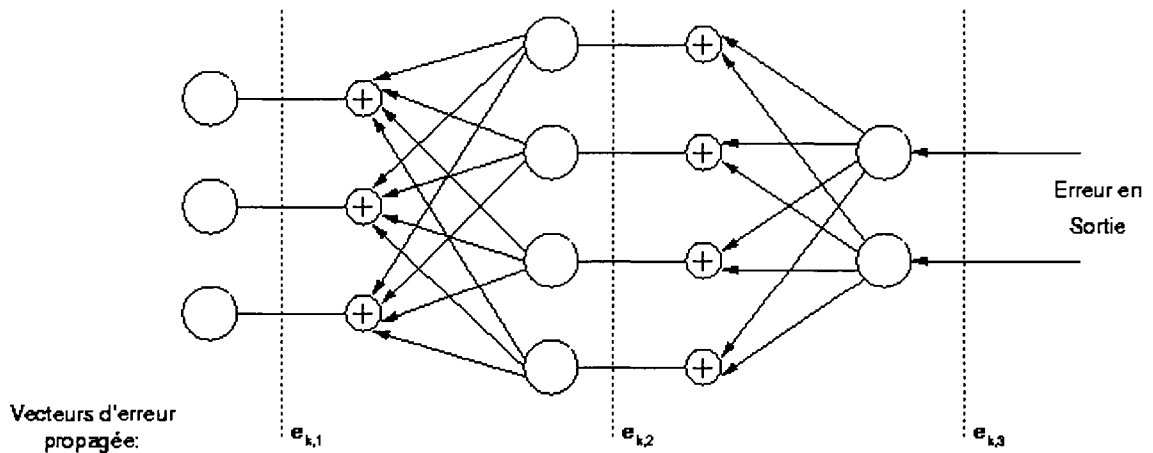


Figure A.31 : Principe de la rétropropagation [Rumelhart et coll., 1986]

L'expression de la descente de gradient sous cette forme permet une réalisation simple de l'algorithme. À chaque itération, les différents vecteurs $a_{k,1}$ puis la sortie du perceptron sont calculés en utilisant l'équation A9 en allant de la couche 1 à la couche N_c , puis les erreurs sont calculées en utilisant l'équation A15 en allant de la couche N_c à la couche 1. Enfin les poids de chaque neurone sont mis à jour en utilisant l'équation A14.

Lorsque l'on augmente le nombre de couches, on constate que l'algorithme d'apprentissage nécessite de plus en plus d'itérations pour converger vers un résultat. C'est pour cette raison que l'on dépasse rarement deux couches cachées dans un PMC. De plus une ou deux couches cachées suffisent généralement pour approximer ce que l'on veut. Un perceptron multicouche est capable d'approximer des fonctions de forme très différente. Le choix du nombre de couches et du nombre de neurones est primordial dans un perceptron. En ajoutant des neurones ou des couches on améliore les capacités du réseau et donc la finesse de l'approximation, mais l'apprentissage devient plus long (particulièrement en augmentant le nombre de couches) et le risque de surapprentissage augmente. Généralement ces nombres sont déterminés expérimentalement, mais certains algorithmes itératifs existent également. On peut commencer avec un petit réseau et ajouter progressivement des neurones, ou au contraire commencer avec un grand réseau et enlever des neurones.